

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Doutorado em Ensino de Física

**Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico
na formação de professores de Física segundo a perspectiva
sociocultural**

Jader da Silva Netto

Porto Alegre
2015

**Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico
na formação de professores de Física segundo a perspectiva
sociocultural¹**

Jader da Silva Netto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação da profa. Dra. Fernanda Ostermann e coorientação do prof. Dr. Cláudio José de Holanda Cavalcanti como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ensino de Física.

Porto Alegre

2015

¹ Trabalho parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Dedico este trabalho às duas mulheres que representam muito para mim, por serem batalhadoras em suas trajetórias e por nunca me deixarem desistir. Eli e Iraci, isso é para vocês e por vocês.

AGRADECIMENTOS

Na minha trajetória pessoal e profissional, saindo de uma cidade do interior, do campo, onde quase tudo que diz respeito ao estudo é difícil, não seria possível constituir minha trajetória pessoal e profissional, que foi se constituindo ao longo do tempo, se não tivesse recebido apoio, das mais diversas formas, de muitas pessoas que passaram pelo meu caminho e outras tantos por cujos caminhos eu passei. Peço desculpas aos que, certamente, deixarei de mencionar, não por menosprezo, mas porque realmente a memória não permitiria lembrar de tantas pessoas. Permitam-me usar algumas linhas para expressar minha gratidão.

À minha orientadora, Fernanda Ostermann, pela paciência, compreensão e pelos diversos ensinamentos durante minha trajetória na UFRGS; seu olhar criterioso, simpatia e elegância ao dar os ‘puxões de orelha’ marcam um estilo incomparável de orientação, desmistificando a figura clássica do orientador que reside no imaginário de um pós-graduando e transmitindo muita tranquilidade a quem tem o privilégio de ser seu orientando;

Ao meu coorientador, Cláudio Cavalcanti, por abraçar a pesquisa e participar em todos os momentos do trabalho, indo da teoria à prática em sala de aula, programando, corrigindo, sugerindo e estudando junto comigo; sua forma rigorosa de ver a Física (especialmente a Quântica) e seus aspectos epistemológicos abriram meus olhos em diversos momentos e ficam como um alerta permanente;

À toda minha família por ter acreditado em mim, pelo suporte que me proporcionou e também pela oração, especialmente à minha esposa e aos meus filhos, por aceitarem minha ausência, compreenderem quando o cansaço e a impaciência davam forma a um ser irritadiço no nosso lar e pelas inúmeras vezes em que alteraram sua rotina para que eu pudesse ter a tranquilidade necessária aos meus estudos;

À banca do exame de qualificação, na pessoa dos professores Emerson Luna, Neusa Massoni e Orlando Aguiar Júnior, pela forma carinhosa e crítica com que analisaram o trabalho desenvolvido, contribuindo para a transformação desta pesquisa em diversos aspectos;

Aos amigos e valiosos interlocutores Alexsandro Pereira, Josiane de Souza e Paulo Lima Júnior, pelos momentos de descontração, companhia em alguns eventos e, principalmente, pelas longas conversas seja em relação aos referenciais teóricos ou à pesquisa em ensino;

Aos professores Eliane Veit e Fernando Lang, pelo que aprendi com vocês desde o Mestrado Profissional e pela forma detalhada e crítica de ver a Física e o seu ensino, com a qual tive a oportunidade de me 'contaminar' um pouco;

Aos meus colegas Alex Vieira, Camila Debom e Leonardo Heidemann pela amizade, coleguismo e pela parceria seja nos momentos de estudo ou no 'compartilhamento' de materiais muito valiosos nos momentos de sufoco;

Ao meu colega e amigo Maurício Henrique de Andrade, que muito me inspira na forma de ver e ensinar a Física, pelas longas horas de conversa, pelo interesse no meu trabalho e pelos diversos questionamentos que sempre me fazem pensar um pouco mais;

Aos alunos que participaram desta pesquisa, pela receptividade e empenho demonstrados;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro que possibilitou custear o desenvolvimento das novas versões do *software* utilizado na pesquisa.

*A vida só pode ser comprendida, olhando-se para trás;
mas só pode ser vivida, olhando-se para frente.*

Soren Aabye Kierkegaard

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada em um Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia e dedicou-se ao estudo de alguns conceitos de Física Quântica na formação de professores de Física, sob a perspectiva do referencial sociocultural, tendo o foco dirigido à complementaridade de segundo tipo, uma das teses da interpretação de Copenhagen, e ao emaranhamento quântico. O marco teórico-metodológico adotado foi a teoria da mediação de Vygotsky e a filosofia translinguística de Bakhtin. Foram realizados três estudos qualitativos com o objetivo de investigar quais são os significados socialmente construídos sobre conceitos de Física Quântica por professores de Física em formação, sendo um estudo piloto e duas intervenções didáticas junto a uma disciplina de Física Moderna e Contemporânea em nível de graduação. As atividades de ensino foram conduzidas a partir de exposições teóricas e simulação computacional com o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder, orientada por roteiros exploratórios. A partir do estudo dos fenômenos da interferência e emaranhamento quânticos nesse dispositivo semiótico, buscou-se compreender em que medida as ações mediadas pelo uso do *software* como recurso didático atuaram no sentido de promover entre os professores uma construção conceitual colaborativa sobre esses conceitos da Física Quântica. A análise do discurso, fundamentada em conceitos bakhtinianos, possibilitou uma melhor compreensão sobre o processo de construção de conceitos culturalmente válidos acerca da interferência quântica, da complementaridade e do emaranhamento. No contexto explorado, verificamos que se estabeleceu o dilema da manutenção de visões antagônicas, o que pode ser evidenciado a partir dos modelos explicativos elaborados pelos estudantes. Para aqueles que atribuíram um caráter corpuscular aos fótons, os fenômenos intermediários permanecem como um conflito ainda não resolvido, enquanto para os demais a complementaridade onda-partícula passou a compor um nova classe de conceitos. A noção de não-localidade, necessária para compreender o emaranhamento quântico, não foi reconhecida pelos estudantes, evidenciando a forte presença de noções clássicas nos modelos explicativos utilizados na tentativa de obter uma explicação plausível para o fenômeno.

Palavras-chave: Referencial Sociocultural, Ensino de Física Quântica, Formação de Professores, Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder.

ABSTRACT

The research presented in this thesis was developed in a Federal Institute of Education, Science and Technology is directed to research about an approach of the some foundations of Quantum Physics in pre-service teachers' training, based on the sociocultural perspective and this work focuses on the second kind of complementarity, one of the thesis of the Copenhagen interpretation, and the quantum entanglement. The theoretical and methodological framework adopted in this research is the Vygotsky's theory of mediation and Bakhtin's translinguistics philosophy. Three qualitative researches were performed in order to investigate which are the socially constructed meanings on QP foundations in the context of pre-service teachers' training: one in an introductory course with physics teachers and two along a didactic intervention during a pre-service teachers' training course on Modern and Contemporary Physics. The teaching activities were conducted mediated by theoretical lectures and computer simulation using the Virtual Mach-Zehnder Interferometer, conducted by the exploratory guide. From the study of interference phenomena and quantum entanglement in this semiotic tool, one tries to understand how the pupils actions are mediated by the software in the sense of promoting a collaborative conceptual construction among teachers about these foundations of QP. Discourse analysis grounded on Bakhtin's concepts allowed us to evaluate the potentialities of the software and a better understanding of the process of conceptual construction that are culturally valid about quantum interference, complementarity and entanglement. In this context we perceive that was created the dilemma of maintaining competing visions, which can be evidenced from the explanatory models designed by the students. For the students that admitted a corpuscular character to photons so that intermediate phenomena remain as a unresolved cognitive conflict, while for others the wave - particle complementarity has become a new class of concepts. The non-locality notion, pre-requisite to understand the quantum entanglement, wasn't learned by the students, demonstrating the strong presence of classical notions in explanatory models used to obtain a plausible explanation for the phenomenon.

Keywords: Sociocultural perspective, Quantum Physics teaching, Pre-service teachers training; Virtual Mach-Zehnder Interferometer.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Por que pesquisar sobre a formação docente em Física Quântica.....	1
1.2	Objetivos da pesquisa.....	7
1.3	O contexto institucional.....	9
1.4	Conceitos centrais da Física Quântica abordados na pesquisa.....	13
2	INTERPRETAÇÕES DA FÍSICA QUÂNTICA.....	15
2.1	Interpretações realistas.....	15
2.2	Interpretações positivistas.....	26
2.2.1	Interpretação corpuscular positivista.....	26
2.3	Interpretações antirrealistas.....	27
2.3.1	A Interpretação de Copenhagen.....	27
2.3.2	Interpretação das Histórias Consistentes.....	31
2.4	O emaranhamento quântico e os debates mais recentes.....	33
3	A FÍSICA DO INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER.....	37
3.1	Descrição quântica do Interferômetro de Mach-Zehnder.....	37
3.1.1	O operador que representa a ação dos divisores de feixe.....	40
3.1.2	Propriedades do operador S_1	43
3.1.3	O operador que representa a ação do espelho.....	44
3.1.4	Diferença de fase devido à existência de dois braços no interferômetro (diferença de caminho).....	45
3.1.5	A ação do interferômetro de Mach-Zehnder e a interferência quântica nas portas de saída, na ausência de detectores.....	45
3.1.6	Distribuição de probabilidades nos anteparos.....	46
3.2	O Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder.....	49
3.3	Complementaridade onda-partícula no IVMZ.....	52
3.4	Emaranhamento Quântico no IVMZ.....	59
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	64
4.1	Objetivo e metodologia.....	66
4.2	Organização das categorias de análise.....	68
4.2.1	Trabalhos de revisão.....	69
4.2.2	Propostas didáticas.....	70
	Propostas didáticas implementadas em sala de aula.....	70
	Propostas didáticas não-implementadas em sala de aula.....	82

4.2.3	Propostas de arranjos experimentais para introdução da Física Quântica.....	85
4.2.4	Artigos de pesquisa	89
4.2.5	Levantamento de concepções em FQ.....	101
5	REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO.....	106
5.1	A teoria da mediação de Vygotsky: aspectos gerais.....	107
5.1.1	Conceitos-chave da teoria de Vygotsky explorados nesta pesquisa 111	
5.2	A filosofia translinguística de Bakhtin: aspectos gerais.....	122
5.2.1	Conceitos-chave da translinguística bakhtiniana para esta pesquisa 126	
5.2.2	Enunciado.....	129
5.2.3	Contexto extraverbal	130
5.2.4	Gêneros discursivos e dialogismo	132
5.3	Procedimentos de análise.....	134
6	METODOLOGIA DA PESQUISA E RESULTADOS.....	135
6.1	Atividades de ensino e coleta de dados.....	135
6.2	Primeira etapa da coleta de dados: o estudo piloto	139
6.2.1	O contexto sociocultural de onde falam os professores	141
6.2.2	Síntese dos diálogos entre os professores de Física e encaminhamentos.....	144
6.3	Contexto de realização da segunda e terceira etapas da pesquisa....	149
6.3.1	Contexto extraverbal dos interlocutores	149
	Um panorama do contexto extraverbal imediato	149
	Contexto extraverbal intermediário: o contexto institucional.....	151
	Contexto extraverbal amplo: o contexto sociocultural	152
6.4	Interações discursivas na segunda etapa da pesquisa.....	161
6.5	Interações discursivas na terceira etapa da coleta de dados.....	215
6.6	Síntese dos resultados.....	251
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	256
	REFERÊNCIAS.....	260
	APÊNDICE A	281
	APÊNDICE B	283
	APÊNDICE C	287

APÊNDICE D	289
APÊNDICE E	290
APÊNDICE F.....	292
APÊNDICE G.....	295
APÊNDICE H	298

1 INTRODUÇÃO

1.1 Por que pesquisar sobre a formação docente em Física Quântica

O processo de ensino-aprendizagem na escola atual demanda uma série de atitudes de professores e alunos. Entre elas, citam-se os questionamentos acerca da finalidade do ensino, diversidade de temas que devem ser estudados e outros aspectos importantes que transcendem a sala de aula, como evasão, desvalorização do magistério como profissão, entre outros. Também são importantes fatores como a cultura científicista no ensino de ciências, a qualidade dos livros didáticos ou o problema recorrente da formação para a docência.

Há tempos a comunidade de pesquisadores em Ensino de Física defende que é importante a abordagem de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) em nível de Ensino Médio. Desde a primeira metade da década de 90 (TERRAZZAN, 1992; 1994) até os dias atuais, diversos estudos foram realizados sobre esse tema. Ao longo desses mais de 20 anos após o primeiro estudo no Brasil, muito se avançou, passando-se das fases de justificativa sobre a importância em se desenvolver tópicos de FMC (CUPPARI *et al.*, 1997; FREIRE JR. *et al.*, 1995; GIL, PÉREZ e SOLBES, 1987; 1988; PINTO e ZANETIC, 1999; SOLBES *et al.*, 1987) e investigação acerca de quais seriam os temas de maior relevância e interesse, chegando-se ao estágio das pesquisas que envolvem produção de materiais didáticos (NETO, OSTERMANN e PRADO, 2010; OSTERMANN, 1999; OSTERMANN e CAVALCANTI, 1999; OSTERMANN, FERREIRA e CAVALCANTI, 1998) e propostas de ensino (CHIARELLI, 2006; FANARO, OTERO e ARLEGO, 2009; MICHELINI *et al.*, 2000; NETO, OSTERMANN e PRADO, 2011; OSTERMANN e MOREIRA, 2000; PÉREZ e SOLBES, 2006).

Em relação aos livros didáticos, a avaliação dos livros de Física aprovados no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) de 2012, realizada por Dominguni *et al.* (2012) permitiu verificar uma grande variedade de temas de FMC que poderiam ser explorados nas salas de aula. A partir desta análise, o que se pode concluir é que os livros didáticos praticamente não abordam conceitos fundamentais da Física Quântica (FQ), ficando restritos apenas à chamada ‘velha’ FQ², não indo além do átomo de Bohr.

² Considera-se, neste trabalho, a velha FQ como aquela que compreende o conjunto de teorias que explicavam os fenômenos da radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, efeito Compton e outros, incluindo ainda os modelos do átomo de hidrogênio postulados por Bohr e Sommerfeld. Essas teorias

Desta forma, tanto como professor em curso de Licenciatura em Física e como pesquisador no ensino dessa ciência, entendemos como motivos de preocupação tanto a forma como está ocorrendo o ensino quanto o conteúdo ensinado, particularmente no que se refere à FMC.

Procurando alinhar-se às tendências atuais de pesquisa em Ensino de Física no que se refere à inserção de tópicos de FMC no nível médio, o foco da investigação apresentada nesta tese foi a aprendizagem de conceitos fundamentais da FQ por professores em formação.

Aliado a estas preocupações, tem-se a legislação educacional, como a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional de 1996 (BRASIL, 2015), que destaca a necessidade de haver uma reforma em todos os níveis de educação, inspirada nas transformações pelas quais passa a sociedade. De acordo com o disposto no inciso II do artigo 53 dessa lei, as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) vêm ao encontro do espírito de flexibilização dos currículos de graduação, pretendendo ultrapassar o atual modelo dos currículos mínimos. Neste documento oficial, prevalece um elevado grau de detalhamento de disciplinas e cargas horárias o que, de certa forma, impede as Instituições de Ensino Superior (IES) de desenvolverem projetos pedagógicos inovadores. Por outro lado, nada impede o investimento em estratégias de ensino diferenciadas, que permitam explorar diversas potencialidades.

De acordo com as DCN para os Cursos de Física (BRASIL, 2001), são alguns objetivos a serem alcançados na formação nesta área:

- **Dominar princípios** gerais e fundamentos da Física, estando familiarizado com suas áreas clássicas e modernas;
- **Descrever e explicar fenômenos naturais, processos e equipamentos tecnológicos em termos de conceitos**, teorias e princípios físicos gerais;
- Desenvolver uma ética de atuação profissional e a consequente responsabilidade social, **compreendendo a Ciência como conhecimento histórico**, desenvolvido em diferentes contextos sócio-políticos, culturais e econômicos [Grifos nossos]

Esse documento cita também algumas habilidades gerais a serem desenvolvidas:

- Propor, elaborar e **utilizar modelos físicos**, reconhecendo seus domínios de validade;
- **Utilizar os diversos recursos da informática**, dispondo de noções de linguagem computacional;

foram propostas nas duas primeiras décadas do século XX, antes da FQ ser formalmente desenvolvida por Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Von Neumann e outros.

- Reconhecer as **relações do desenvolvimento da Física com outras áreas do saber**, tecnologias e instâncias sociais, especialmente contemporâneas; (*ibidem*) [Grifos nossos]

Considerando esses aspectos apontados na legislação, a revisão bibliográfica de Dominghini *et al.* (2012) e a diversidade de temas, conforme já citado, no âmbito das investigações sobre o ensino da FMC, a necessidade de se pesquisar a formação docente em FQ assume fundamental importância. Por um lado, a legislação aponta uma série de objetivos a serem alcançados no ensino de graduação em Física e, por outro, os livros didáticos de Física utilizados no Ensino Médio estão em descompasso com o que existe de mais atual em termos de pesquisa em Ensino de Física, tanto em relação aos conteúdos quanto à metodologia.

Observa-se, tanto em escolas de Ensino Médio quanto no Ensino Superior, que há um distanciamento entre o que prega a legislação e o que de fato ocorre (KAWAMURA e HOSOUME, 2003; REZENDE JR. e SOUZA CRUZ, 2009; RICARDO e ZYLBERSZTAJN, 2002). Ao invés de promover uma integração entre conhecimentos, perpetua o estudo isolado de diversos temas, desconsiderando tanto sua origem histórica, inserção social e cultural, quanto as suas implicações sejam estas tecnológicas ou epistemológicas. Nosso posicionamento sobre o que seria um currículo mais atual passa pelo reconhecimento do currículo enquanto espaço de encontro entre aspectos sócio-político-econômico-histórico-culturais, que deve permitir a superação de visões fragmentadas e servir como um fórum privilegiado para a construção de caminhos que levem a visões mais críticas na formação dos cidadãos. No campo da ciência, para que esse currículo seja considerado atual, é essencial oportunizar abordagens não só do tempo passado, mas do presente, confrontando posicionamentos filosóficos e epistemológicos de cada época. Assim, é imprescindível olhar para a pesquisa contemporânea e tudo o que ela possibilitou, seja em termos de aprofundamentos teóricos, epistemológicos ou no desenvolvimento de tecnologias. Um currículo mais atual em Física, portanto, não pode relegar a Física do século XX a um segundo plano, pois vários elementos essenciais que foram citados podem ser contemplados no seu estudo.

Têm recebido destaque na pesquisa em Ensino de Física as investigações acerca do ensino de FMC e de FQ em nível médio e na formação de professores e, ao se fazer referência, em poucos trabalhos, a uma Física mais atual, defende-se o ensino de conceitos fundamentais da FQ. Ostermann e Ricci (2005) resumem o estágio atual dos

cursos de formação de professores de Física, argumentando que comumente encontram-se

[...] abordagens semiclássicas nas quais a Mecânica Quântica é introduzida de maneira fortemente correlacionada com a Mecânica Clássica, seja em seus fundamentos e pressupostos mais básicos, seja em sua evolução histórica. Esse tipo de abordagem acaba relegando a um segundo plano questões cruciais, como a de que os objetos quânticos são de uma natureza muito diversa dos objetos clássicos (p. 11).

Nesse sentido, se a formação de professores de Física sobre essa temática não for construída com uma base sólida de conhecimentos que permita a esses profissionais reconhecer a ciência como algo em constante evolução, o conhecimento científico se restringirá ao que está escrito nos livros didáticos com os quais irão se deparar. Se o que se deseja é que os estudantes de Ensino Médio tomem conhecimento de uma Física mais atual, é imprescindível que o seu professor tenha uma sólida formação (OSTERMANN e PRADO, 2005).

Em relação ao processo de formação docente, um estudo recente realizado por Pereira e Ostermann (2009) revela dados preocupantes. Os autores analisaram a produção acadêmica sobre o ensino de FMC em todos os níveis de escolaridade no período de 2001 a 2006, a partir da consulta a artigos das principais revistas³ da área de ensino de ciências do Brasil e do exterior. Os autores identificaram apenas sete trabalhos envolvendo professores em formação (ANJOS *et al.*, 2001; ARRIASSECQ e GRECA, 2004; KALKANIS, HADZIDAKI e STAVROU, 2003; OSTERMANN e MOREIRA, 2004; OSTERMANN e RICCI, 2004; 2005; PEDUZZI e BASSO, 2005).

Fica evidente a pouca atenção dos pesquisadores no que se refere à formação de professores e a articulação dessa formação com o ensino de tópicos de FMC no nível médio. Portanto, é fundamental investir esforços no contexto de formação de professores.

³ As revistas analisadas nessa pesquisa foram: A Física na Escola, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência & Educação, Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências, Investigações em Ensino de Ciências, Revista Brasileira de Ensino de Física, Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, *American Journal of Physics*, *Enseñanza de las Ciencias*, *International Journal of Science Education*, *Physics Education*, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, *Science Education* e *Science & Education*.

Por esse motivo, a presente investigação está voltada à formação docente acerca da aprendizagem de conceitos fundamentais da FQ⁴, uma área de estudos considerada complexa e que explora sistemas físicos que apresentam comportamento contraintuitivo, impossível de ser descrito pela Física Clássica. Esta complexidade formal e conceitual que se atribui à FQ é, possivelmente, um dos motivos para que seus conceitos fundamentais não sejam abordados sistematicamente nas escolas. Por outro lado, nos espaços de formação docente, onde muitas inquietações poderiam ser minoradas, quase que invariavelmente, a FQ é ministrada partindo da sua formulação matemática com pouco ou nenhum momento dedicado aos aspectos conceituais que poderiam ser relacionados ao seu formalismo. Essa maior valorização de procedimentos matemáticos acaba por promover um distanciamento da FQ no que diz respeito aos seus conceitos e sua conexão com resultados experimentais e interpretações. O que resulta disso é que a FQ é rotulada como algo extremamente complicado e abstrato, de forma que os professores em formação não a compreendem e muito menos sentem-se capacitados para ensiná-la aos seus alunos no nível médio, principalmente depois que estiverem afastados dos bancos das universidades. É necessário, portanto, promover a compreensão do formalismo matemático como linguagem da FQ e isso não pode ocorrer isoladamente dos aspectos conceituais.

Como se pode ver, as pesquisas que vêm sendo realizadas justificam de diversas formas a importância de se investigar a formação docente no que se refere à introdução de conceitos fundamentais da FQ nos cursos de formação inicial, com vistas ao seu ensino na educação básica, assim como a investigação de como esse processo ocorre.

Em relação ao *status* atual da Física como ciência e sua contraposição com o que é ensinado nas escolas, percebe-se que há um grande distanciamento entre estes aspectos. Considerando o avanço teórico proporcionado pelas pesquisas na FQ, as implicações sociais, culturais e econômicas produzidas não podem deixar de ser discutidas na escola (PINTO e ZANETIC, 1999). A física que normalmente é ministrada em sala de aula não raramente vai além da Física Clássica e, quando esse limite é ultrapassado, avança até a velha FQ. O presente trabalho visa contribuir para o aprimoramento do processo de formação docente em relação à FQ e assim possibilitar

⁴ Por exemplo, a versão fraca e forte da dualidade onda partícula (PESSOA JR., 2005), complementaridade entre comportamento corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos, emaranhamento, etc.

que os professores, melhor formados, sintam-se mais preparados para promover a melhoria do currículo de Física das escolas. Negar o acesso à FQ através de currículos ultrapassados incentiva a alienação, uma vez que priva os estudantes do acesso à cultura científica.

Nesse sentido, Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009) destacam a importância dos estudos relativos ao ensino de FQ na formação de professores para a construção de estratégias capazes de promover mudanças significativas na educação básica. Possíveis transposições didáticas dos fundamentos da FQ para o Ensino Médio dependem fortemente de uma sólida formação conceitual por parte dos professores de Física (OSTERMANN *et al.*, 2009).

Entende-se que para prover essa sólida formação conceitual o estudo da FQ, tanto em nível médio quanto na formação de professores, precisa abordar aspectos considerados fundamentais como a dualidade onda-partícula (PEREIRA, 2008) e o paradoxo EPR (POSPIECH, 1999), que impulsionou as pesquisas sobre o emaranhamento quântico (ASPECT, 2006).

Assim, como contexto para realização desse estudo voltado à formação de professores no que se refere a conceitos fundamentais da FQ, foi escolhido o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Bento Gonçalves (IFRS-BG), onde o autor deste trabalho atua como docente no curso de Licenciatura em Física.

O referencial vygotskyano fundamentou a investigação sobre como ocorre a construção de significados em um ambiente de ensino colaborativo, integrado a ferramentas analíticas fundamentadas na translinguística de Bakhtin, conforme será apresentado no capítulo 5. Buscou-se, com esta pesquisa, responder às seguintes questões:

- 1- Em que medida as ações mediadas pelo uso dos recursos didáticos desenvolvidos atuam na criação da Zona de Desenvolvimento Proximal dos professores em formação?
- 2- Quais são os significados construídos sobre fundamentos de FQ em sala de aula por professores em formação que trabalham em duplas, contando com a ajuda de parceiros mais capazes no contexto da interação verbal entre sujeitos em um ambiente colaborativo?

- 3- A análise do discurso dos estudantes a partir de conceitos bakhtinianos (como enunciado, interanimação de vozes e contrapalavra) permite evidenciar a construção de conceitos cada vez mais ricos e culturalmente válidos de FQ?

1.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo desta pesquisa consistiu na investigação, no contexto do curso de Licenciatura em Física do IFRS-BG, de como os conceitos de complementaridade⁵ e emaranhamento quântico (dois aspectos centrais da FQ) são apropriados pelos professores em formação. Tal investigação fundamentou-se no referencial sociocultural (WERTSCH, 1993) e contou com o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ) como uma das ferramentas mediadoras usadas a fim de proporcionar a criação de contextos mais ricos de aprendizagem.

Buscou-se, dessa forma, implementar bases teóricas e metodológicas para o ensino de tópicos de FQ à luz do referencial sociocultural, na formação inicial de professores de Física, propiciando aos futuros docentes uma sólida formação conceitual nessa área para que eles se sintam mais seguros e capacitados para atuar como agentes na discussão dos seus conceitos fundamentais no Ensino Médio. A pesquisa desenvolveu-se em 3 etapas.

A primeira etapa, ou o estudo piloto, ocorreu em um curso de extensão, ministrado pelo autor desta pesquisa e intitulado *“Currículo escolar do Ensino Médio e a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea”* que fez parte do programa⁶ de extensão *“Saberes em foco: programa de qualificação para docentes”*. Esse curso, cujo público alvo foram professores de Física, teve carga horária total de 100 horas-aula, sendo 80

⁵ Segundo Pessoa Jr. (2005, p. 93), “na obra de Bohr, é possível distinguir três tipos de complementaridade, no contexto da Física”. Estamos nos referindo aqui ao segundo tipo de complementaridade postulado por Bohr, que seria basicamente a complementaridade entre comportamentos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos (fótons, elétrons ou outros). Auletta *et al.* (2009, p. 19) enuncia a complementaridade entre os comportamentos ondulatório e corpuscular da seguinte forma: “o completo conhecimento sobre o caminho não é compatível com a presença de interferência”. Embora se possa traduzir a palavra “caminho” como um caminho espacial associado ao fóton no contexto do IMZ, isso não necessariamente vale para outros sistemas. A interferência quântica é uma consequência da superposição de estados, não necessariamente vinculados a estados translacionais, e pode ocorrer em uma grande variedade de sistemas – por exemplo, no fenômeno dos batimentos quânticos (*quantum beats*). Para maiores detalhes sobre esse assunto, o leitor pode consultar Greenstein e Zajonc (2006, p. 104-110).

⁶ Este programa, vinculado ao Programa de Extensão Universitária (ProExt/2011) e contemplado no Edital nº 04/2011/MEC/SESu foi composto por cursos de extensão nos campi Bento Gonçalves (área de Física) e Canoas (áreas de Letras e Filosofia) do IFRS.

aulas presenciais realizadas aos sábados e o restante da carga horária à distância. Foram destinadas 8 horas-aula, em outubro/2012, para o estudo da complementaridade onda-partícula via simulação da interferência quântica no IVMZ (OSTERMANN, PRADO e RICCI, 2006).

Os temas abordados nesse curso foram: a estrutura curricular do atual Ensino Médio, a necessidade de inserção da FMC neste nível de ensino, o estudo da supercondutividade e conceitos centrais da FQ. Participaram desse estudo 3 professores.

A segunda e terceira etapas da pesquisa foram realizadas durante a disciplina Física Moderna e Contemporânea I (FMC I), do curso de Licenciatura em Física do IFRS-BG⁷.

Esse curso ocorre no período noturno, com oferta anual de 35 vagas e teve início na instituição no primeiro semestre de 2009. O público alvo da segunda e terceira etapas foram os estudantes matriculados na disciplina citada, que integra o sexto semestre do curso e tem carga horária de 90 horas. O autor deste trabalho é o professor titular da disciplina e para a investigação aqui descrita foram utilizadas 11 horas-aula na segunda etapa, realizada em dezembro/2012 e 16 horas-aula na terceira etapa, realizada em novembro e dezembro/2013. Na segunda etapa a pesquisa centrou-se, novamente, no estudo da complementaridade onda-partícula e na terceira etapa, além desse princípio estudou-se o emaranhamento quântico, através da simulação de estados emaranhados.

De acordo com o plano de curso, a ementa dessa disciplina envolve: origens da teoria quântica, propriedades corpusculares da radiação, postulados de De Broglie e princípio de indeterminação, modelo de Bohr para o átomo, teoria de Schrödinger da Mecânica Quântica. Nesse sentido, é atribuído como objetivo da FMC I a apresentação das questões que levaram à ascensão da Física Moderna, assim como a discussão das teorias físicas que foram propostas no início do século XX. Esse é o primeiro contato

⁷ No campus Bento Gonçalves são ofertados os seguintes cursos: Ensino Médio Integrado com habilitação nas áreas de Informática, Enologia e Agropecuária; Educação Profissional Técnica integrada ao Ensino Médio na modalidade de Educação de Jovens e Adultos (PROEJA) com habilitação em Comércio; Licenciatura (Física, Matemática e Pedagogia); Graduação em Tecnologia (Logística, Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Viticultura e Enologia, Horticultura, Alimentos); Pós-Graduação (Especialização em Viticultura e Especialização em Educação).

formal dos estudantes com a Física Moderna⁸ em nível de graduação, sob a forma de uma disciplina específica.

Essa disciplina apresenta uma ementa bastante restrita, no entanto, para realização da presente pesquisa foram incluídos os seguintes tópicos: introdução ao formalismo de Dirac, postulados da FQ, conceitos centrais da 1ª e da 2ª revoluções da FQ, interpretações filosóficas da FQ e a Física do Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) no regime clássico e no regime quântico.

1.3 O contexto institucional

Conforme o artigo Art. 6º da lei de criação dos Institutos Federais (IFs), enquanto integrante da Rede Federal de Educação Científica e Tecnológica, o IFRS-BG⁹ e as demais instituições têm por finalidades e características:

I - ofertar educação profissional e tecnológica, em todos os seus níveis e modalidades, **formando e qualificando cidadãos com vistas na atuação profissional nos diversos setores da economia, com ênfase no desenvolvimento socioeconômico local, regional e nacional;**

II - desenvolver a educação profissional e tecnológica como processo educativo e investigativo de geração e adaptação de soluções técnicas e tecnológicas às demandas sociais e peculiaridades regionais;

[...] IV - orientar sua oferta formativa em benefício da consolidação e fortalecimento dos arranjos produtivos, sociais e culturais locais, identificados com base no mapeamento das potencialidades de desenvolvimento socioeconômico e cultural no âmbito de atuação do Instituto Federal;

[...] VIII - **realizar e estimular a pesquisa aplicada, a produção cultural, o empreendedorismo, o cooperativismo e o desenvolvimento científico e tecnológico** (BRASIL, 2008) [Grifos nossos].

No Art. 7º dessa lei são apresentados os objetivos destas instituições de ensino:

[...] III - **realizar pesquisas aplicadas, estimulando o desenvolvimento de soluções técnicas e tecnológicas, estendendo seus benefícios à comunidade;**

⁸ Além da FMC I, a formação dos alunos nesta área continua com outras duas disciplinas, sendo: Física Moderna e Contemporânea II, no sétimo semestre, com 60 horas (Objetivos: apresentar as soluções da equação de Schrödinger para diferentes potenciais, determinar autovalores e autofunções, demonstrar a visão quântica de momento angular e de spin em um átomo e compreender as taxas de transição e regras de seleção em um átomo); Física Moderna e Contemporânea III, no oitavo semestre, também com 60 horas (Objetivos: apresentar e discutir os conteúdos de Física nuclear, de partículas elementares e a teoria da relatividade restrita de Einstein).

⁹ Assim como as demais 37 Instituições Federais de Educação, Ciência e Tecnologia do país, o IFRS-BG teve origem a partir da Lei Nº 11.892, de 29 de Dezembro de 2008 e integra a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica. Este instituto originou-se mediante integração do Centro Federal de Educação Tecnológica de Bento Gonçalves (CEFET-BG), Escola Técnica Federal de Canoas e Escola Agrotécnica Federal de Sertão. Sua estrutura multicampi é hoje formada por 17 campi: Bento Gonçalves, Canoas, Caxias do Sul, Erechim, Farroupilha, Feliz, Ibirubá, Osório, Porto Alegre, Restinga, Rio Grande e Sertão, sendo 5 em fase de implantação (Alvorada, Rolante, Vacaria, Veranópolis e Viamão).

IV - desenvolver atividades de extensão de acordo com os princípios e finalidades da educação profissional e tecnológica, em articulação com o mundo do trabalho e os segmentos sociais, e com ênfase na produção, desenvolvimento e difusão de conhecimentos científicos e tecnológicos;

V - **estimular e apoiar processos educativos que levem à geração de trabalho e renda e à emancipação do cidadão na perspectiva do desenvolvimento socioeconômico local e regional;** e

VI - ministrar em nível de educação superior:

a) cursos superiores de tecnologia visando à formação de profissionais para os diferentes setores da economia;

b) **cursos de licenciatura, bem como programas especiais de formação pedagógica, com vistas na formação de professores para a educação básica, sobretudo nas áreas de ciências e matemática,** e para a educação profissional (BRASIL, 2008) [Grifos nossos].

Os aspectos grifados nestas citações são característicos dos IFs como um todo, mas merecem destaque no caso do IFRS-BG a fim de uma melhor caracterização do meio onde este se insere. Conforme destacado, cabe à instituição ofertar cursos que atendam às demandas de sua região, desenvolvendo tecnologias e produzindo conhecimentos que solucionem os problemas da sua comunidade. O IFRS-BG está situado em uma cidade que tem população de cerca de 107 mil habitantes (ONU, 2013), altos índices de desenvolvimento econômico e é conhecida nacionalmente como capital do vinho e polo moveleiro. A indústria tem representatividade econômica em torno de 70 por cento, também merecendo destaque as áreas de transportes e o turismo. Dessa forma, a qualificação de cidadãos para atuarem junto ao mercado produtivo faz com que o campus seja reconhecido pela sua vocação nos cursos voltados à área de tecnologias.

Embora o próprio texto da lei de criação dos IFs, conforme grifado, defenda a produção de conhecimento e não apenas a capacitação profissional para atender às demandas locais e regionais, facilmente percebe-se no discurso de muitos professores, elementos carregados de uma visão tecnicista do ensino. Esse discurso vai na contramão do que é defendido pelo Ministério da Educação, segundo o qual

A dimensão ideológica do atual governo, na verdade, faz aflorar um descompasso entre a trajetória das instituições federais de educação profissional e tecnológica e da própria educação profissional como um todo e o novo projeto de nação: se o fator econômico até então era o espectro primordial que movia seu fazer pedagógico, o foco a partir de agora desloca-se para a qualidade social (BRASIL, 2010, p. 14).

Mesmo com o texto dos documentos oficiais sinalizando para essa mudança de paradigma, seja em reuniões de professores ou em conversas informais, não raramente persistem enunciados caracterizando a educação profissional e a função principal do Instituto como sendo a preparação dos profissionais apenas para atender às exigências

do mercado. Reconhece-se a necessidade de que a oferta de cursos na instituição atenda às demandas de formação que se apresentam, entretanto, percebe-se que tanto por questões históricas¹⁰ no âmbito institucional, quanto por questões socioculturais, ainda persiste a visão simplista e preconceituosa em relação à educação profissional.

Uma vez que a própria legislação prega a verticalização do ensino, promovendo a oferta de cursos desde o Ensino Médio até a pós-graduação, convivem, no mesmo ambiente, estudantes que buscam formação em diversas áreas e níveis. Não obstante essa diversidade, percebem-se elementos característicos da chamada racionalidade técnica¹¹, bastante presente na visão que os estudantes têm do processo de ensino. Em relação a essa racionalidade, Contreras (2002) propõe que a ideia básica desse modelo

é que a prática profissional consiste na solução instrumental de problemas mediante a aplicação de um conhecimento teórico e técnico, previamente disponível, que procede da pesquisa científica. É instrumental porque supõe a aplicação de técnicas e procedimentos que se justificam por sua capacidade de conseguir os efeitos ou resultados desejados. [...] O aspecto fundamental da prática profissional é definido, por conseguinte, pela disponibilidade de uma ciência aplicada que permita o desenvolvimento de procedimentos técnicos para análise e diagnóstico dos problemas e para o tratamento de soluções (p. 90-91).

A fim de combater essa visão dicotômica entre teoria e prática, o processo de ensino-aprendizagem no IFRS-BG é conduzido no sentido de valorizar a experiência de vida dos estudantes e a contextualização dos conhecimentos teóricos na prática, de modo a possibilitar que diferentes realidades socioculturais sejam absorvidas, possibilitando a síntese de novos conhecimentos. A formação profissional ofertada nessa instituição, segundo os seus propósitos, procura distanciar-se da prática utilitária, entretanto, esta nova mentalidade parece não estar consolidada. O histórico da formação ofertada ao longo de várias décadas sinaliza para o ideal da formação que visa atender às necessidades imediatas do mercado de trabalho.

Em relação aos saberes produzidos no contexto da prática utilitária imediata, Ciavatta e Ramos (2012) argumentam que estes “colocam o homem em condições de

¹⁰ O conflito entre a nova realidade institucional e uma visão mais conservadora é observado nos discursos de muitos profissionais na instituição, com longo tempo de serviço na mesma, que ainda se referem ao contexto de escola (Escola Agrotécnica Federal), nomenclatura que não é mais usada há mais de uma década. O mesmo acontece em relação aos habitantes de Bento Gonçalves, de modo que raramente sabem onde fica o instituto federal, mas se localizam perfeitamente fazendo referência à antiga escola.

¹¹ A racionalidade técnica é baseada no treinamento de habilidades, no qual o professor é visto como um genuíno reprodutor/treinador de saberes que foram produzidos por especialistas na sua área, de modo que aprende o bastante a fim de poder conduzir o processo de ensino-aprendizagem (RAMALHO, NÚÑEZ e GAUTHIER, 2004).

orientar-se no mundo, de familiarizar-se com as coisas e manejá-las, mas não proporciona a compreensão das coisas e da realidade (p. 27)”. Isso significa que estes ‘saberes utilitários’ cumprem um importante papel no que se refere à inserção do homem enquanto trabalhador, entretanto, os mesmos não são suficientes para sua valorização enquanto sujeito cognoscitivo. Para que essa transformação ocorra é preciso, segundo Frigotto *et al.* (2011), articular ciência, trabalho e cultura.

No documento que apresenta as concepções e diretrizes dos IFs, as justificativas para oferta de cursos de licenciatura são um exemplo da necessidade em atender às exigências do mercado de trabalho. Destacam-se: a carência de professores, principalmente na área das ciências da natureza e também a importância que os institutos assumem como facilitadores do acesso a cursos de formação de professores, vindo a fazer parte de uma política de valorização do magistério e melhoria na qualidade do ensino no país (BRASIL, 2010).

No que tange ao ensino ofertado nos IFs, somente será possível compreender o futuro das políticas educacionais que são implantadas no país com o estudo e a análise crítica da relação entre as transformações produtivas, as mudanças no mundo do trabalho e suas repercussões nas reformas educacionais. Nesse sentido, conforme aponta Rodrigues,

[...] a análise das mudanças nos processos de formação humana [...] pode revelar se esse processo busca readequar a formação de professores às necessidades típicas dos novos paradigmas da acumulação de capital, ou [se] se compromete, de fato, com a universalização da educação com qualidade, como afirma o discurso oficial (RODRIGUES, 2005, p. 1).

Tradicionalmente, a escola de onde viemos e de onde continuam vindo nossos alunos, supervalorizou o ‘como fazer’ em prejuízo do ‘o que fazer’ e ‘por que fazer’. Os professores são vistos como os detentores do conhecimento e a escola é considerada um local onde se aprendem valores e conhecimentos acabados.

Particularmente, no caso do curso de Licenciatura em Física do IFRS-BG, considerável parcela dos estudantes com os quais se tem convivido, há pelo menos cinco anos, reconhece a ciência como instrumento, atribuindo mais importância àqueles conhecimentos que têm alguma aplicação/implicação imediata, notadamente de cunho tecnológico. Ricardo *et al.* (2007) já apontava para o fato de que os professores de Física trazem em seus discursos aspectos que sinalizam para uma defesa da tecnologia, encarando-a de forma simplista como ciência aplicada.

1.4 Conceitos centrais da Física Quântica abordados na pesquisa

Há muito tempo se busca uma compreensão sobre o que vem a ser a luz e quais as suas propriedades fundamentais. Essa discussão gerou disputas entre Isaac Newton, defensor de uma teoria corpuscular e Christian Huygens, o qual propôs que a luz tinha comportamento ondulatório. No início do século XIX, em 1801, a experiência da dupla fenda de Thomas Young aparentemente finalizou a discussão, corroborando que a luz sofre interferência e, a partir de então, ela foi assumida como sendo um fenômeno de natureza ondulatória. Nesse mesmo século, por volta dos anos 1860, Maxwell desenvolveu o que pode ser considerado a base do eletromagnetismo clássico, as equações de Maxwell, unificando o eletromagnetismo e a óptica e, assim, reforçando ainda mais o caráter ondulatório da luz.

A partir do início de século XX, quando se deu o que se chama de 'o início¹² da FQ', a busca pela compreensão da radiação do corpo negro e, logo em seguida, do efeito fotoelétrico, fez com que a natureza ondulatória da luz passasse a ser fortemente questionada.

Nesse período, até por volta dos anos 1920, pode-se dizer que houve a primeira revolução da FQ, que tem como conceito central a dualidade onda-partícula (ASPECT, 2006). Enquanto vários resultados experimentais indicavam que a luz, considerada um fenômeno ondulatório, apresentava comportamento corpuscular, de Broglie postulou a existência de um comportamento ondulatório associado à matéria. A dualidade onda-partícula foi, por muitos anos, considerada o aspecto fundamental da FQ e, segundo a famosa frase de Richard Feynman, configurava como único mistério da FQ (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 1963).

Mais tarde, em 1935, tiveram início as discussões sobre outro fenômeno que viria a se revelar ainda mais enigmático, o emaranhamento quântico. Essas discussões vêm à tona com o famoso artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, no qual apresentaram o que ficou conhecido como Paradoxo EPR (EINSTEIN, PODOLSKY e ROSEN, 1935). Foi um

¹² De acordo com um levantamento realizado por Maximiano *et al.* (2011), na maioria das obras aprovadas no PNLD/2012 propõe-se a inserção da FMC em capítulos específicos e ao final da 3ª série do Ensino Médio. Entre os temas mais recorrentes nestas obras estão a Teoria da Relatividade Especial e o efeito fotoelétrico, sendo que este último aparece sob o título de FQ. Neste caso, toda a Física do século XX que é apresentada se reduz ao conhecimento que foi produzido até por volta de 1920. Além disso, a FQ é, praticamente, reduzida ao efeito fotoelétrico, consistindo num grave erro histórico e conceitual. Se por um lado se prega a abordagem de uma Física mais atual, por outro, o que se vê nos livros didáticos são sinais de um ensino defasado.

marco importante para a teoria quântica consistindo numa segunda revolução da FQ. O paradoxo EPR se aplica, essencialmente, a casos em que pelo menos dois objetos quânticos estão envolvidos (dois sistemas quânticos) e consiste basicamente no fato de que o resultado de uma medição realizada em uma parte desse sistema possa ter um efeito instantâneo sobre o resultado de uma medição que ocorre na outra parte. Este efeito poderia ocorrer qualquer que fosse a distância entre as duas partes do sistema. Essa estranha correlação que existe entre sistemas separados espacialmente parecia indicar que a teoria estava realmente incompleta.

A discussão desses conceitos fundamentais da FQ, como a complementaridade onda-partícula e o emaranhamento quântico, foi realizada nessa pesquisa a partir de uma ferramenta mediadora central, o IVMZ, que será apresentado no capítulo 3.

Esse trabalho representa a continuidade dos estudos que vêm sendo realizados no nosso grupo de pesquisa na UFRGS no sentido de aprofundar questões sobre o ensino de conceitos de FQ e compreender quais são as estratégias utilizadas pelos estudantes na aprendizagem desses conceitos. Em trabalhos anteriores (PEREIRA, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2009a; 2012), a análise discursiva realizada revelou importantes resultados que dizem respeito: às potencialidades do *software* para explorar conceitos de FQ, a atuação do parceiro mais capaz na resolução de problemas e a cognição distribuída, além de identificar características de fala privada nas explicações dos alunos.

Com a nossa pesquisa, que também utiliza o IVMZ como ferramenta mediadora e se vale da análise bakhtiniana, procuramos contribuir com os estudos anteriores no sentido de promover uma maior compreensão acerca do processo de negociação de significados por professores em formação, explorando novos horizontes conceituais e buscando na interanimação de vozes identificar as vozes discursivas e contrapalavras utilizadas (e sua relevância) na apropriação, por cada estudante, dos conceitos de FQ estudados. Para isso foi utilizada uma nova versão do IVMZ, com a implementação de recursos que permitem explorar fenômenos que antes não eram possíveis, como a complementaridade onda-partícula (via simulação dos fenômenos intermediários na interferência quântica) e os estados emaranhados (fótons emaranhados em estados de polarização).

2 INTERPRETAÇÕES DA FÍSICA QUÂNTICA

A Epistemologia e a Filosofia da Ciência permitem compreender que o desenvolvimento das teorias científicas não ocorre num vazio, seja ele teórico, histórico, epistemológico ou filosófico e a FQ é um belo exemplo disso.

Na árdua tarefa de obter um formalismo¹³ consistente para a teoria quântica, de um lado estavam Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan, em 1925, desenvolvendo a mecânica matricial e de outro, em 1926, Erwin Schrödinger. Este por sua vez, fortemente influenciado pelo trabalho de Louis de Broglie acerca dos estados estacionários, buscou uma formulação¹⁴ matemática baseada em uma equação de onda capaz de descrever o movimento do elétron, introduzindo assim a noção de pacote de onda. Dessa forma, Schrödinger e Heisenberg deram início à formulação da base matemática sobre a qual a FQ começava a ser erguida.

Embora as diferentes formulações desenvolvidas por Schrödinger e Heisenberg tenham se mostrado equivalentes, estes adotaram posturas filosófico-epistemológicas diferentes. É sobre este viés que esta seção procura trazer algumas interpretações da FQ, organizadas segundo seu caráter epistemológico e ontológico. No que se refere ao caráter epistemológico as interpretações estão agrupadas em seções que se alinham ao realismo, antirrealismo e ao positivismo. Dado esse caráter epistemológico, procurou-se destacar a ontologia do objeto quântico, que pode concebido de maneira corpuscular, ondulatória ou dualista (OSTERMANN e PRADO, 2005).

2.1 Interpretações realistas

O caráter realista¹⁵ das interpretações considera que a FQ é uma teoria que busca representar um mundo cujas características são independentes de medições ou da

¹³ Jammer (1974) se refere ao formalismo como sendo o esqueleto lógico de uma teoria. Este teria como seus estruturantes não apenas as constantes lógicas e as expressões matemáticas, mas também termos descritivos capazes de caracterizar o objeto de estudo sem, necessariamente, pertencer ao vocabulário da lógica formal. No caso da FQ, termos como partícula e função de estado se enquadrariam nesta descrição.

¹⁴ Conforme Ostermann e Prado (2005) por razões de cunho didático-pedagógico é que a possibilidade de analogias com fenômenos da mecânica ondulatória tornou o formalismo proposto por Schrödinger tão difundido nos livros texto e também nas atividades de ensino. Por outro lado, enquanto o formalismo é amplamente difundido, ainda há poucas discussões sobre a sua interpretação nos livros didáticos.

¹⁵ O realismo recebeu grandes influências dos princípios filosóficos positivistas e se desenvolveu com base na observação da realidade, na ciência e na razão. As posturas defendidas por Bohr e Schrödinger se

existência de um observador. Assim, estão aqui agrupadas a interpretação dualista (De Broglie), a ondulatória (Schrödinger), das variáveis ocultas (David Bohm), estados relativos (Hugh Everett) e dos *ensembles* estatísticos (que dá origem a uma interpretação corpuscular realista tratada nesta seção e a uma interpretação corpuscular positivista, explorada na seção 2.2).

Ao estudar a luz como fenômeno ondulatório, em 1922, e tendo conhecimento dos trabalhos de Einstein e Brillouin¹⁶, De Broglie investigou a possibilidade de uma onda ser associada a um elétron livre.

Considerou dois observadores: um que observa o elétron em repouso (observador I) e o segundo que observa o elétron com velocidade u (observador II). Para o observador I, o pacote de onda está localizado próximo à partícula e a frequência da onda é obtida pela relação de Einstein $\nu = E / h$. Sendo a energia de repouso do elétron expressa por $E_1 = mc^2$ pode-se reescrever a frequência como $\nu_1 = mc^2 / h$. Para o observador II, a energia do elétron é escrita como $E_{II} = mc^2 / \sqrt{1 - u^2 / c^2}$ e a frequência é $\nu_{II} = mc^2 h / \sqrt{1 - u^2 / c^2}$ (OMNÈS, 1999). Desta forma, associando periodicidade ao quantum de luz, De Broglie obteve frequências distintas (uma considerando a dilatação do tempo e a outra a partir da aplicação da variação relativística da energia à equação de Planck para quantização da energia). Posteriormente, mostrou que essas duas frequências estariam associadas a oscilações em fase em relação a um ponto em movimento e que neste ponto estaria a partícula (PESSOA JR., 2010). A velocidade do pacote de onda seria igual à velocidade do elétron, de modo que a onda acompanha o movimento do elétron. De Broglie estava, portanto, associando o movimento da partícula a uma propagação ondulatória.

referem a um realismo ontológico, o qual se opõe ao idealismo propondo a existência de uma realidade que é independente do conhecimento e da percepção humana. Além do realismo ontológico, cabe destacar na vertente filosófica realista: o realismo epistemológico propõe que esta realidade existente pode ser alcançada, mesmo que não seja observada; realismo ingênuo corresponde à crença de que o mundo exterior existe e é exatamente como o percebemos, de modo que não há nada entre nós e os objetos, uma vez que temos acesso direto a eles; o realismo crítico que é a doutrina epistemológica segundo a qual o mundo exterior não é uma construção mental, uma vez que temos acesso a ele de forma indireta através de nossas representações mentais, as quais não são fiéis aos objetos, fazendo com que seja difícil reconhecer a verdade ou atingi-la. A interpretação de Copenhagen, como pode ser visto mais adiante, nega o realismo epistemológico (PESSOA JR., 2005).

¹⁶ Conforme escrevem Martins e Rosa (2014), Brillouin estava interessado em interpretar as condições de quantização de Bohr. Para isso, considerou que os elétrons de um átomo, em movimento em um meio elástico (o éter), emitiriam ondas. Devido à diferença entre as velocidades de propagação da onda e da partícula, estes elétrons acabariam por interceptar as ondas emitidas e isso aconteceria apenas sob determinadas condições.

Esta interpretação dualista proposta por De Broglie, em 1925, concebe o elétron no átomo como uma partícula com posição e velocidade bem definidas a cada instante, além de atribuir uma onda ao mesmo (a onda piloto, representada por ψ).

Inspirado pela concepção da onda atribuída à partícula e pela analogia entre a óptica e a mecânica, proposta por Hamilton, Schrödinger buscou uma equação de onda e, em 1926, apresentou uma interpretação ondulatória para a teoria quântica, defendendo a descrição dos fenômenos a partir de funções de onda. Elétrons e fótons seriam pacotes de onda, aos quais era atribuído um estado ψ , que não poderia ser observado diretamente na natureza. Sua compreensão se daria a partir da interpretação física do módulo quadrado da função de onda, $|\psi|^2$, proposta por Max Born, o que conferia um caráter probabilístico à teoria. Assim, as funções de onda descreveriam probabilidades que evoluem no tempo segundo a equação de Schrödinger.

Apesar de ter a vantagem de poder atribuir uma ontologia ao objeto quântico a todo instante, tanto a interpretação ondulatória de Schrödinger quanto a dualista de De Broglie não conseguiam explicar, de forma satisfatória, as detecções pontuais em um experimento como, por exemplo, a interferência realizada com fótons em fenda dupla. A alternativa teórica encontrada nesse caso foi admitir o colapso da função de onda¹⁷, em termos próprios da interpretação ondulatória. Por outro lado, o que parecia estar resolvido acabava gerando outros questionamentos, pois esse colapso seria um evento não-local¹⁸. Isto daria origem a algum mecanismo de ação a distância capaz de impedir

¹⁷ O que desencadeia esse colapso, ou a forma como ocorre, consiste no problema da medição. Os sistemas quânticos evoluem segundo uma função de onda, descrita pela equação de Schrödinger, na forma de uma superposição linear de vários estados. A medição em si, por sua vez, sempre encontra o sistema em um dado estado e sua evolução futura depende desse estado 'medido'. John von Neumann, em 1932, procurou oferecer uma solução ao problema da medição através do postulado da projeção, segundo o qual a equação de Schrödinger perderia sua validade durante a medição. Segundo Osnaghi (2005, p. 82) é exatamente esta a função desempenhada pelo postulado de projeção, "a de quebrar de maneira não determinista a evolução "unitária" (ou seja: contínua, determinista e reversível) do vetor de estado em concomitância com o ato de observação".

¹⁸ Segundo Redhead (1987), os elementos de realidade que pertencem a um dado sistema não são influenciados pelas medições que são realizadas, à distância, em outros sistemas. Isso caracteriza a localidade no âmbito da Física. Os efeitos, na natureza, se propagam a uma velocidade finita, que é igual à velocidade da luz e, para que um observador, ou um sistema, possam 'tomar conhecimento' de um dado evento é necessário que alguma informação chegue até eles (por exemplo, a luz emitida ou refletida, a partir dos sistemas físicos envolvidos em tal evento). A teoria quântica, por sua vez, é uma teoria não-local, ou seja, é como se a informação sobre algum evento pudesse se propagar instantaneamente. Precisamos ter cuidado para não sermos levados a pensar em uma aparente violação da Teoria Especial da Relatividade. Não é isso que ocorre, pois uma frente de onda que poderia carregar tal informação não se propaga com velocidades superiores à da luz. Na FQ, estados quânticos emaranhados 'colapsam' de modo simultâneo durante a medição sobre um dos subsistemas emaranhados e isso ocorre independente

que a onda repartida no espaço produzisse uma ação em dois lugares ao mesmo tempo em um anteparo.

Einstein questionou este colapso não-local da função de onda a partir de um experimento de pensamento durante o 5º Congresso de Solvay, realizado em 1927 e cujo tema era 'Elétrons e Fótons'. Para isso, considerou um pacote de onda que passa por uma fenda, sofrendo difração e dando origem a uma onda esférica. Argumentou que, $|\psi|^2$ representa simplesmente a probabilidade de que em certo lugar uma partícula seja detectada em um instante determinado. Em diferentes locais de um anteparo há diferentes probabilidades de detecção e, assim, seria admissível que um único processo produzisse ação simultânea em dois ou mais lugares do anteparo (detecção em um ponto de um anteparo e, instantaneamente, uma probabilidade zero de detecção nos outros pontos) (PESSOA JR., 2005). Esta situação é a mesma que era observada na câmara de Wilson, onde a radiação se apresentava como partículas com trajetórias retilíneas. Heisenberg, ao buscar justificativa para suas relações de indeterminação com a experiência de pensamento do microscópio de raios gama, acabou priorizando, inicialmente, uma interpretação corpuscular e propôs que a explicação ao questionamento de Einstein seria o distúrbio provocado pelo observador no sistema observado, de modo que a observação reduziria a onda de probabilidade a um estreito pacote de onda.

Outra possível solução para esse problema viria a partir da interpretação ondulatória, mas não propriamente da teoria da onda piloto, abandonada por De Broglie após esse congresso. A onda piloto não tinha uma interpretação física e a formulação da teoria da qual fazia parte não era capaz de explicar a medição. Entretanto, admitir a existência da onda piloto resolvia o problema da não-localidade. A partícula teria uma posição e velocidade bem definidas, sendo guiada pela onda-piloto e o termo $|\psi|^2$ mantinha sua interpretação como amplitude de probabilidade de detecção da partícula. Assim, a resposta estaria em uma teoria de variáveis ocultas onde, nesse caso, a posição seria um observável, ao contrário de sua velocidade (a variável oculta).

da separação espacial entre estes subsistemas. Este aspecto da não-localidade será retomado de forma mais detalhada na seção 2.4.

Essa nova teoria, teoria da onda piloto de De Broglie-Bohm, mais conhecida como interpretação causal da FQ, foi apresentada em 1952, nos trabalhos¹⁹ de David Bohm, como uma interpretação alternativa à interpretação ortodoxa (de Copenhague). Bohm defendia o determinismo na FQ e a eliminação de qualquer separação entre sistema e aparelhos de medição ou observador. Cada partícula estaria sob a ação de um potencial quântico e a função de onda de Schrödinger a guiaria de modo que sua posição, mesmo não podendo ser observada, seria bem definida a cada instante. De acordo com essa teoria, em cada medição sobre um observável revela-se um valor pré-existente para o mesmo, ao contrário da interpretação ortodoxa, para a qual os resultados são probabilísticos (existe uma série de resultados possíveis para uma medição em um sistema quântico, cada resultado com uma probabilidade de ocorrência).

Ao criticar o posicionamento antirrealista dos defensores da interpretação de Copenhague (cujos princípios se apoiavam somente sobre aquilo que podia ser observado), Bohm recorreu a alguns exemplos da história da pesquisa científica para argumentar que essa postura filosófica representava um atraso para o desenvolvimento da teoria quântica. Atribuir realidade a elementos que sequer tinham sido observados diretamente, como o átomo, por exemplo, permitiu explicar resultados da microfísica. Por outro lado, positivistas como Mach, se apoiaram em bases filosóficas manifestando-se contrários à existência do átomo porque este nunca havia sido observado e reconheciam a hipótese atômica apenas como uma alternativa para o estudo de propriedades da matéria (BOHM, 1952b). Finalmente, Bohm²⁰ faz uma analogia ao caso da função de onda de um sistema individual, a qual poderia sim representar uma realidade objetiva. A esse respeito, em trabalho publicado recentemente, Ringbauer *et al.* (2015) argumentam que

[...] partindo do princípio de que alguma realidade subjacente existe, nossos resultados reforçam a ideia de que toda a função de onda deveria corresponder diretamente a essa realidade. A única alternativa é a adoção de conceitos mais heterodoxos, como a retrocausalidade, ou abandonar completamente qualquer noção de realidade objetiva (p. 1) [tradução nossa].

¹⁹ Estes trabalhos foram publicados em duas partes, no mesmo volume e número, do periódico *Physical Review* sob o título *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables* (BOHM, 1952a; 1952b).

²⁰ Freire Jr. (2015, p. 27) escreve que “as crenças marxistas de Bohm e o papel desempenhado pelas críticas dos físicos e filósofos soviéticos contra a interpretação da complementaridade” podem ter sido fundamentais para o início da interpretação causal.

Em outras palavras, há espaço para adotar uma interpretação realista (embora limitada), mas também uma interpretação que assuma uma ruptura com a noção de realidade objetiva, como a de Copenhagen.

Bohm contestou também a prova de von Neumann de que a teoria quântica não era consistente com sua teoria de variáveis ocultas. Argumentou que tal prova não se aplicava à sua teoria, uma vez que os parâmetros considerados por von Neumann não eram os mesmos (BOHM, 1952b). As variáveis ocultas de Bohm envolviam tanto o sistema observado quanto o estado do aparelho de medição.

John Bell, ao referir-se ao trabalho de Bohm demonstrou grande entusiasmo, escrevendo que

[...] Em 1952 eu vi o impossível ser feito. [...] Bohm mostrou explicitamente como parâmetros poderiam de fato ser introduzidos, na mecânica ondulatória não-relativística, com a ajuda dos quais a descrição indeterminista poderia ser transformada em determinista (BELL, 1987, p. 160).
[...] Eu sempre senti que as pessoas não entenderam as ideias daqueles *papers* ... e infelizmente elas continuam sendo a maioria ... são deficientes em qualquer discussão sobre o significado da mecânica quântica (BELL, 1987, p. 173).

Ao ler o trabalho de Bohm, Bell percebeu a natureza não-local da teoria e, em 1964, partindo da hipótese da localidade, derivou o que veio a ficar conhecido como desigualdades de Bell. Esta relação entre os trabalhos de Bohm, Bell e o desenvolvimento posterior da FQ está novamente descrita ao final da seção 2.4, no estudo do emaranhamento quântico. Trata-se de um conjunto de desigualdades que deve ser satisfeito por todas as teorias locais, mas que foram violadas pela FQ. Dessa forma, as desigualdades de Bell acabam dando forte apoio por demonstrar que teorias locais de variáveis ocultas não conseguem descrever sistemas quânticos.

O trabalho de Bell e a publicação de uma versão modificada do trabalho de 1952 por Bohm e Bub (1966) despertaram em parte da comunidade científica um grande interesse pela teoria de variáveis ocultas. Nesta reformulação, o estado do sistema quântico é especificado inteiramente em termos de vetores, assim como as variáveis ocultas, fazendo uso do espaço de Hilbert. A nova formulação permitia, a partir da média dos parâmetros ocultos, obter os mesmos resultados estatísticos da FQ. Em relação à teoria apresentada, argumentaram que esta “em sua forma atual, sofre de uma série de inadequações, mas fornece uma nova estrutura conceitual na qual algumas questões podem ser consideradas, o que não pode ainda ser formulado no âmbito da mecânica quântica” (BOHM e BUB, 1966, p. 469).

Mais recentemente, nos anos 1990, tornou-se conhecida a abordagem chamada de Mecânica Bohmiana, a qual não mais atribui realidade física à onda piloto, mas mantém a ideia do 'guiamento' das partículas que foi introduzida por De Broglie. Tal abordagem se constitui em uma teoria quântica onde não há observadores, isto é, a teoria é formulada em termos de eventos objetivos, independente da existência ou não do observador.

Segundo a interpretação de Bell, na Mecânica Bohmiana

[...] não se atribuem momento angular e energias às partículas, mas somente posições como função do tempo. Os resultados de medições particulares de momento angular, energias e assim por diante, emergem como posições dos ponteiros em dispositivos experimentais apropriados (BELL, 1990, p. 39).

A Mecânica Bohmiana foi, inclusive, capaz de tratar o caso relativístico, mas não será dado maior detalhamento sobre isso neste texto.

Contemporânea da teoria das variáveis ocultas de Bohm, a interpretação dos estados relativos de Hugh Everett III tem ontologia ondulatória e foi apresentada como sua tese de doutorado²¹, em 1957, propondo uma nova forma de interpretar os enigmas da FQ.

De acordo com a formulação usual da teoria quântica, a função de onda ψ contém toda a informação sobre o estado de um sistema fechado, que é representado por um vetor no espaço de Hilbert. Este estado fornece as probabilidades de se obterem diferentes resultados de uma medição e evolui de duas formas²²: determinista e linear conforme a equação de Schrödinger ou indeterminista, no decorrer da medição, visto que o sistema passa, instantaneamente, de uma superposição de estados a um autoestado particular. Essa redução de estado é descrita pelo postulado da projeção de

²¹ Everett teve John Wheeler como seu orientador. Bohr e Wheeler (1939 *apud* Dyson, 2010) publicaram, poucos meses após a descoberta da fissão nuclear um importante artigo, onde usavam o modelo da gota líquida para explicar a fissão nuclear: *The mechanism of nuclear fission*. O êxito foi obtido ao utilizar a noção de complementaridade de Bohr, combinando conceitos clássicos e quânticos. Outra contribuição importante de Wheeler aos fundamentos da teoria quântica foi a proposição do experimento de pensamento conhecido como experimento de escolha demorada (WHEELER, 1978), realizado por Jacques *et al.* (2007).

²² Estas duas formas distintas de evolução originam o que é conhecido na teoria quântica como problema da medição. Esta oposição evidente de como evolui o sistema torna-se problemática quando são consideradas duas hipóteses. A primeira se refere ao fato de que um estado quântico pode ser atribuído ao aparelho de medição macroscópico, podendo até incluir um observador consciente. A segunda considera que o sistema incluindo objeto e aparelho de medição pode ser tomado como um sistema fechado (em relação ao ambiente), o que exigiria que sua evolução fosse determinista, entretanto, as medições realizadas sobre o objeto implicariam em processos indeterministas através das reduções de estado.

von Neumann e, de acordo com a interpretação de Copenhague, corresponde ao colapso da função de onda.

O questionamento²³ que Everett propunha se refere a como aplicar a teoria quântica a sistemas isolados, sem a presença de observadores externos, uma vez que as “probabilidades envolvidas na teoria aparecem em função do postulado de projeção, porém a redução de estado não pode acontecer sem um observador externo” (FREITAS e FREIRE JR., 2008a, p. 5). Mesmo que o ataque mais direto da interpretação dos estados relativos fosse sobre o postulado da projeção, acabou configurando, de forma indireta e inevitável, um enfrentamento à interpretação de Copenhague. Everett defendia, em linhas gerais, que o sistema quântico se divide em universos paralelos que coexistem, mas que apenas um ou outro é ‘observado’ na medição.

Segundo esta interpretação, o observador é parte integrante do sistema observado, de modo que haveria uma função de onda universal, unindo observadores e objetos quânticos como um sistema único. Tal função de onda teria quantas subdivisões/bifurcações fossem necessárias para representar cada uma das interações do observador com os objetos, ou seja, conseguiria dar conta de todas as alternativas possíveis através de universos paralelos onde, em cada um, o observador obteria um resultado na medição (FREITAS e FREIRE JR., 2008b). Assim, a medição sobre uma partícula que apresenta uma superposição de estados pode ser compreendida a partir da coexistência de vários universos onde cada um deles representaria um resultado possível, uma ‘bifurcação’ na função de onda, que representaria uma realidade e que ocorreria independentemente da existência ou não de um observador. Estes universos coexistiriam, mas não teriam influência um sobre o outro. Tal situação ganhou até uma representação pictórica na capa da revista *Nature*, numa das edições de julho de 2007, quando se deu destaque aos 50 anos da interpretação de Everett.

²³ Na verdade, há outras discordâncias de Everett em relação à evolução do estado dos sistemas quânticos, as quais podem ser sintetizadas na questão central que este apresentou. Conforme Freitas e Freire Jr. (2008a) os problemas apontados foram: 1) na evolução do estado de um sistema utilizando mais de um observador (A e B, por exemplo) e um sistema S, quando toma-se um sistema fechado S' (composto por A+S) que está sujeito a observações de B este observador terá ou não a função de estado de S'?; 2) a impossibilidade da descrição de medições imperfeitas (aparato e sistema físico interagem fracamente) por operadores de projeção, de modo que não se consegue determinar precisamente nem o resultado no aparelho nem o estado remanescente do sistema; 3) questiona o universo como um sistema fechado e a observação externa na teoria quântica, pois se assim fosse, não seria possível induzir o colapso da função de onda, visto que não haveria os observadores externos para efetuarem a transição de um estado para outro.

A noção de estados relativos de Everett refere-se ao fato de que

Quando uma interação de medição ocorre entre um observador e um sistema em um nível objetivo, ambos os sistemas passam a estar correlacionados e o observador percebe (mede) o sistema em todos os possíveis autoestados. Em um nível subjetivo, em cada um dos termos da superposição final, o observador terá medido um resultado específico relativo aos outros resultados do sistema. Com essa noção, nunca existe, de um modo geral, um resultado específico após uma medição. Ao contrário, sempre existirá uma série de resultados, uns relativos aos outros e todos igualmente reais (FREITAS e FREIRE JR., 2008b, p. 15).

A interpretação proposta, na concepção de Everett e Wheeler era, na verdade, uma tentativa de mostrar que esta era uma generalização da interpretação baseada no princípio da complementaridade de Bohr. Mantinha o caráter determinista da teoria quântica e não recorria à variáveis ocultas, mas isso também não garantiu a sua pronta aceitação (OSNAGHI, FREITAS e FREIRE JR., 2009). As divergências entre essas duas interpretações envolviam, por exemplo, o significado que o vetor de estado tinha para cada uma. Na visão de Everett, o vetor de estado tem um papel descritivo e consegue dar conta de todo o sistema físico, oferecendo uma descrição objetiva. Para Bohr, o vetor de estado serve apenas para prever resultados das medições que são realizadas num contexto experimental bem determinado e não se relaciona com propriedades físicas do sistema, tanto as que ele já tem quanto aquelas que poderá adquirir na medição.

O fracasso na visita de Everett a Copenhague para discutir a sua interpretação (estados relativos) e a formulação deficiente da mesma, aliados a incentivos financeiros para quem se dedicasse à defesa nacional dos Estados Unidos devido à Guerra Fria, decretou, segundo Freitas e Freire Jr. (2008b), o encerramento de sua carreira acadêmica na Física. Além disso, a pequena quantidade de citações do trabalho de Everett, na década seguinte à apresentação da sua tese, indicam que sua teoria praticamente havia caído no esquecimento.

Esta situação se alterou definitivamente nos anos finais da década de 1970, quando o cosmologista Bryce S. DeWitt reconsiderou a interpretação de Everett, inserindo aspectos ontológicos e verificou que era a melhor para o problema que estava enfrentando, uma vez que seu interesse era a quantização do vetor de estado que descrevesse a evolução do universo como um todo. Assim, a aplicação da interpretação dos estados relativos ressurgiu a partir da cosmologia (rebatizada de *interpretação dos muitos mundos*), sendo muito bem recebida não apenas por cosmólogos, mas também

por interessados em fundamentos da FQ, impulsionando estudos sobre decoerência²⁴ (FREIRE JR., 2004).

Há, na literatura, muitas outras interpretações da FQ, mas abordá-las neste texto o tornaria demasiadamente extenso. Para fechar essa discussão, de forma bastante resumida, esta seção continua com a interpretação dos *ensembles* estatísticos.

A interpretação dos *ensembles* estatísticos da teoria quântica tem como propósito a interpretação a partir de um número reduzido de suposições. Ao invés da descrição de sistemas físicos individuais propõe, de modo geral, a descrição estatística²⁵ do estado quântico de um conjunto de sistemas, preparados de forma similar. O estado puro consegue informar certas propriedades estatísticas desse conjunto de sistemas, mas não fornece uma descrição completa dos sistemas individuais. Ao assumir que cada observável já tem um valor definido, a interpretação dos *ensembles* estatísticos escapa do problema da medição, entretanto, precisa recorrer à noção de distúrbio incontrolável no *momentum* do objeto quântico para explicar, de modo satisfatório, as medições sucessivas em observáveis incompatíveis. Essa concepção de que os valores de um observável já estão definidos se aplica tanto para o futuro quanto para o passado (retrodição) e, novamente aplicando ao caso de observáveis incompatíveis, a incapacidade de prever estes valores é atribuída às limitações tanto do processo de preparação do estado quanto da medição (PESSOA JR., 2005).

²⁴ Decoerência refere-se à perda de coerência entre os componentes de um sistema quântico que se encontra num estado de superposição. Isso ocorre, por exemplo, em sistemas quânticos que não são tomados de forma isolada do ambiente, de modo que há interação entre ambos. Pode-se dizer que se estabelecem correlações quânticas entre os estados do sistema quântico e o ambiente, de modo que o estado original é perdido. A decoerência pode ser tomada como um 'limite', uma fronteira entre o clássico e o quântico, uma vez que o comportamento do sistema após a perda de coerência é o comportamento do mundo clássico. A decoerência passou a ser explorada nos fundamentos da FQ a partir dos trabalhos de Zeh (1970), Zurek (1981) e Joos e Zeh (1985).

²⁵ Einstein aceitava uma versão estatística para a interpretação da FQ, rejeitando a ideia de que o vetor de estado fornece uma descrição completa de sistemas físicos individuais. Ao responder uma das críticas presentes em alguns ensaios do volume *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* que integra a série *The Library of Living Philosophers*, Einstein toma como exemplo uma situação apresentada por Bohr (EINSTEIN, 1970). Einstein se refere ao argumento de Bohr de que não há razão para que qualquer existência independente entre si seja atribuída a dois sistemas parciais A e B (vistos separadamente) que formam um sistema total, descrito por uma função ψ_{AB} , nem mesmo se estiverem espacialmente afastados um do outro no instante considerado. A afirmação de que "a real situação do sistema B não poderia ser diretamente influenciada por qualquer medição em A é, portanto, no âmbito de teoria quântica, imprecendente e inaceitável" (EINSTEIN, 1970, p. 681-682). Vendo dessa forma, tem-se um paradoxo que obrigaria a renunciar que a caracterização por meio da função ψ está completa ou que os estados reais dos objetos espacialmente separados independem uns dos outros. A saída proposta por Einstein é aderir à segunda opção e para isso considera que a função ψ fornece a descrição de um *ensemble* estatístico de sistemas, o que representa um evidente desacordo com a interpretação de Copenhagen.

Nessa interpretação, as probabilidades são encaradas como sendo propriedades do método com que os estados são preparados e independem de medições subsequentes, embora as frequências estatísticas de uma sequência de medições, onde cada uma é precedida por uma preparação de estado, pode ser preparada para se aproximar de uma distribuição de probabilidades. Assim, as probabilidades são propriedades do estado, representam uma ‘medida do conhecimento’ e a sua utilização é necessária apenas pela incompletude do próprio conhecimento.

No que diz respeito à ontologia do objeto quântico, na interpretação dos *ensembles* estatísticos este é concebido estritamente de maneira corpuscular, entretanto, no viés epistemológico coexistem duas visões: corpuscular realista e corpuscular positivista.

Pessoa Jr. (2005) se refere à interpretação corpuscular realista salientando que esta teve como defensores Alfred Landé, Edwin Kemble, Dmitrii Blokhintsev, Henry Margenau, Karl Popper e Leslie Ballentine. O pouco destaque dado a esta interpretação possivelmente seja devido à sua grande dificuldade em explicar fenômenos relativamente simples como, por exemplo, a formação de padrões de interferência em experimentos com elétrons ou fótons individuais.

Landé não mencionou a complementaridade de Bohr e mostrou em detalhes como as teorias de partícula e onda levavam a resultados idênticos para espalhamento Rutherford de ondas de matéria, para o espalhamento Thomson de raios de luz, para o efeito Zeeman, além de outros processos. Conforme Jammer (1974), já era possível verificar que estava se propondo uma nova abordagem, pois Landé, mesmo admitindo que

tanto a teoria ondulatória quanto a corpuscular eram regimes autoconsistentes, enfatizou que em experimentos de difração as partículas produzem intensidade de difração máxima e mínima por meio de um processo mecânico perfeitamente normal que, no entanto, é formalmente relacionado com a explicação ondulatória (JAMMER, 1974, p. 454).

Insatisfeito com o poder explicativo da interpretação de Copenhague, da qual se tornou um grande oponente após a publicação de seu livro, em 1955, Landé propôs uma FQ a partir de três postulados (simetria, correspondência e covariância), os quais considerava “simples, plausíveis e quase autoevidentes” (*ibidem*).

No que tange às relações de indeterminação de Heisenberg, por exemplo, teríamos apenas uma limitação estatística, mas seria possível atribuir valores bem definidos simultaneamente para observáveis incompatíveis. Seria mais coerente na linguagem dos *ensembles* estatísticos, referir-se a ‘princípio de distribuição estatística’ de valores, o qual indicaria a mínima dispersão possível em qualquer preparação de estado.

Assim, nessa nova linguagem, para um dado estado haveria uma distribuição estatística dos valores associados a cada observável. Suponhamos uma situação em que se tenha dois observáveis, \hat{A} e \hat{B} canonicamente conjugados. Para obter $\Delta\hat{A}$ seria necessário medir \hat{A} em vários sistemas preparados de modo similar, o que resultaria em uma distribuição estatística dos resultados, possibilitando a obtenção do desvio padrão. Aplicando-se o mesmo procedimento para o observável \hat{B} , vale a relação $\Delta\hat{A}\Delta\hat{B} \geq \hbar/2$. Nesse caso, teríamos que: para qualquer preparação de estado, o produto das distribuições de medições de \hat{A} e de \hat{B} não pode ser menor do que o limite inferior $\hbar/2$ (BALLENTINE, 1970).

2.2 Interpretações positivistas

De forma muito simplificada, o positivismo se caracteriza essencialmente por uma posição filosófica que atribui à ciência a incumbência de descrever, através de suas leis, aquilo que é passível de observação permitindo fazer previsões de novos resultados experimentais e, ao mesmo tempo, não admitindo a formulação de hipóteses sobre quaisquer entes não observáveis.

2.2.1 Interpretação corpuscular positivista

Em relação à interpretação corpuscular positivista dos *ensembles* estatísticos Pessoa Jr. (2012, p. 3) afirma que, para os defensores dessa interpretação, “há apenas uma única interpretação da mecânica quântica, que estaria associada à regra de Born, e que as outras abordagens são apenas elucubrações filosóficas estéreis”. Em um experimento de dupla fenda com elétrons, por exemplo, a teoria quântica não se aplicaria para detecções individuais, mas somente para o caso de um grande número de detecções pontuais. A explicação de Heisenberg, já apresentada nesse texto, para as trajetórias observadas na câmara de nuvens, segundo a qual somente teria sentido

atribuir realidade aos pontos observados (de modo descontínuo) é um belo exemplo da visão corpuscular positivista.

Uma versão mais sofisticada desta interpretação foi apresentada pelo físico israelense Asher Peres e, mais recentemente, por Anton Zeilinger. No estudo de sistemas formados por objetos quânticos correlacionados, que originou o campo da informação quântica (computação, criptografia e comunicação em sistemas quânticos), Zeilinger propôs

[...] uma interpretação baseada no que chamou de princípio de quantização de informação: um sistema quântico elementar, como uma partícula de spin $\frac{1}{2}$, carrega apenas 1 bit de informação. Sua interpretação informacional aplica-se especialmente bem para duas (ou mais) partículas correlacionadas, que no caso mais simples carregam 2 bits.

[...] a interpretação (...) captura a informação essencial de um sistema quântico e não afirma nada além, levando adiante o espírito positivista das interpretações ortodoxas (PESSOA JR., 2008a, p. 7).

2.3 Interpretações antirrealistas

A teoria quântica, segundo uma postura epistemológica antirrealista, é vista a partir de uma perspectiva funcionalista em termos da existência de entidades que não podem ser observadas ou que podem ser observadas apenas de forma indireta. A função de onda ψ , por exemplo, existe apenas até onde funciona na teoria quântica e nada mais pode ser dito sobre ela do ponto de vista ontológico.

2.3.1 A Interpretação de Copenhague

Inicia-se esta discussão a partir da postura filosófica assumida por Heisenberg, que, conforme escreve Pessoa Jr. (2008b),

[...] baseava-se apenas em grandezas atômicas que eram diretamente observáveis, não na posição ou velocidade de um elétron em um átomo, mas na intensidade e na frequência da luz emitida pelo átomo, bem como no plano de oscilação (polarização) dela (p. 34).

Outro personagem importante é Max Born, que preteriu a mecânica matricial frente ao formalismo proposto por Schrödinger quando estudou os processos de colisão em FQ por julgar que esse seria mais adequado. Entretanto, não adotou a postura realista. Em seu discurso, ao receber o Nobel de Física de 1954, Born deixou clara sua postura antirrealista argumentando que todos os resultados experimentais com espalhamento de elétrons de que tinha conhecimento, referindo-se ao experimentos

realizados por James Franck na mesma universidade (Universidade de Göttingen), reforçavam a natureza corpuscular do elétron (JAMMER, 1974). Assim, a interpretação de Born sobre $|\psi|^2$ não atesta a existência de um estado quântico, pois não se pode medi-lo. As probabilidades, por outro lado, podem ser medidas.

Born teve Heisenberg e Pauli como seus assistentes em Göttingen e isso pode sugerir uma influência do mestre sobre seus aprendizes. Por outro lado, Cook (2002) escreve que o próprio Born reconheceu que foi de Heisenberg a ideia fundamental de que as variáveis em FQ deveriam ser quantidades observáveis ao invés de coordenadas clássicas não-observáveis. Segundo Van der Waerden (1967), Heisenberg teria sido fortemente influenciado por Bohr a partir de uma longa conversa entre ambos em Göttingen, na ocasião em que este proferiu uma palestra:

[...] foi a primeira discussão meticulosa que eu me lembro sobre os problemas físicos e filosóficos fundamentais da moderna teoria atômica, e ela certamente teve uma influência decisiva na minha carreira posterior. [...] seu discernimento sobre a estrutura da teoria não era resultado de uma análise matemática das suposições básicas, mas de uma ocupação intensa com o fenômeno atual, de maneira que era possível para ele perceber intuitivamente o relacionamento ao invés de derivá-lo formalmente (p. 22).

Em 1926, em Berlim, Heisenberg fora questionado por Einstein em relação aos princípios adotados na formulação da mecânica matricial. O argumento de Heisenberg de que as órbitas eletrônicas, as quais não podem ser observadas, são passíveis de substituição pelas frequências de oscilação (estas sim, observáveis) e amplitudes correspondentes dos elétrons nos átomos teria desencadeado o seguinte debate:

Mas não crê seriamente - retorquiu Einstein - que se possam aceitar numa teoria física apenas as grandezas observáveis.

Pensava - respondi surpreendido - que fora precisamente o senhor quem estabeleceria esta concepção como base da sua teoria da relatividade! Salientou que não deve falar-se de um tempo absoluto, já que o tempo absoluto não é observável. Só os dados fornecidos pelos relógios, pelo sistema de referência em movimento ou em repouso, é que são decisivos para a determinação do tempo.

Talvez eu tenha utilizado esse tipo de filosofia – respondeu Einstein. Mas, apesar disso, resulta um contrassenso. [...] do ponto de vista dos princípios, é completamente falso pretender basear uma teoria apenas sobre grandezas observáveis. De fato, sucede exatamente o contrário: só a teoria decide sobre o que se pode observar. [...] O fenômeno que é objeto de observação provoca determinados incidentes no nosso aparelho de medida. Em consequência deste fato logo se desenvolvem no instrumento outros processos, que, finalmente, através de certas vias, gravam a impressão sensível e a fixação do resultado na nossa consciência. No decurso de todo este caminho, desde o fenômeno até a sua fixação na nossa consciência, devemos capacitar-nos de como funciona a natureza, devemos conhecer, ao menos praticamente, as leis da natureza, no

caso de pretendermos afirmar que observamos alguma coisa. Só a teoria, isto é, o conhecimento das leis naturais, é que nos permite, portanto, argumentar, a partir da impressão sensível, sobre o processo subjacente (HEISENBERG, 1971, p. 92-93).

Estaria se configurando aqui a manifestação explícita do descontentamento de Einstein em relação à postura de Copenhagen e que se apresentaria de forma mais severa nos debates iniciados com Bohr no congresso de 1927 em Solvay.

Ainda em 1926, Heisenberg aceitou um convite de Bohr para se transferir para o Instituto de Física Teórica em Copenhagen, de modo que o contato com este expoente da Física rendeu muitos outros debates sobre a teoria quântica. No ano seguinte, ambos defenderam, no 5º Congresso de Solvay, o que ficou, mais tarde, conhecido como interpretação de Copenhagen²⁶, ou filosofia de Copenhagen. Esta interpretação, de cunho antirrealista²⁷ (LEITE e SIMON, 2010; PATY, 2010), apoiada por Pauli, Born e grande parte da comunidade científica, tem como conceitos-chave o princípio da complementaridade, o indeterminismo e a impossibilidade de causalidade espaço-tempo, sem deixar de lado conceitos clássicos (BALSAS e VIDEIRA, 2013).

Neste trabalho interessa-nos a complementaridade²⁸ entre partícula e onda, ou complementaridade no sentido de o que um experimento pode revelar, a qual adquiriu

²⁶ Balsas e Videira (2013, p. 252) sugerem que “a expressão interpretação de Copenhagen parece ter sido cunhada por Heisenberg em sua contribuição para o volume comemorativo ao 70º aniversário de Bohr em 1955, aparentemente em uma tentativa de tornar crível uma versão única e unificada da mecânica quântica”. Como apontado na literatura, o ‘espírito de Copenhagen’ se desenvolveu em torno do indeterminismo, da complementaridade e da descrição da função de onda completa de sistemas individuais, entretanto, entre os apoiadores desta interpretação não havia consenso em relação há alguns princípios daquela que era disseminada como visão oficial, única e incontestável de Copenhagen como o subjetivismo total, colapso da função de onda e o papel privilegiado do observador.

²⁷ Muitos dos colaboradores de Bohr adotaram posicionamentos filosóficos divergentes. Conforme afirma Camilleri (2009, p. 27-28) “embora muitos dos principais físicos da década de 1930, incluindo Pauli, Heisenberg, Jordan e Rosenfeld se declararam entusiasmados partidários da ideia de complementaridade de Bohr, as opiniões foram muito diferentes quanto ao seu significado epistemológico e ontológico”. Dirac e Wigner, por exemplo, chegaram a declarar que “não havia nada de substancialmente novo ou esclarecedor na noção de complementaridade de Bohr” e que o trabalho de Heisenberg sobre as relações de indeterminação é que teria sido decisivo para a resolução dos problemas que inquietavam os físicos nos anos 1920. Rosenfeld, Jordan e Pauli, por outro lado, defendiam que a complementaridade era indispensável para qualquer compreensão adequada dos fundamentos da FQ (CAMILLERI, 2009). A diversidade de pontos de vista fica evidente quando Jammer (1974, p. 87) escreve que “[...] a interpretação de Copenhagen não consiste em um conjunto de ideias único, claro e sem ambiguidades que pode ser associado a uma posição filosófica ou ideológica específica”. Ao contrário disso, reuniu posições filosóficas divergentes como o “[...] subjetivismo rigoroso, o idealismo puro através do neokantismo, o realismo crítico, o positivismo e o materialismo dialético”.

²⁸ Os outros dois tipos de complementaridade podem ser organizados em: - complementaridade se referindo ao que a FQ nos permite conhecer, também chamada de complementaridade entre observáveis incompatíveis; - complementaridade como a representação de uma situação física que tentamos construir em nossas mentes, também chamada complementaridade entre coordenação espaço-temporal e

considerável importância a partir de 1935. A complementaridade onda-partícula tem origem a partir do momento em que Bohr finalmente aceitou a dualidade onda-partícula, em contraposição aos *quanta* de luz de Einstein. Tal conceito descreve a situação na qual

[...] é impossível apreender um mesmo acontecimento por dois modos de interpretação distintos. Esses dois modos são mutuamente excludentes, mas também complementam um ao outro, e é somente através de sua justaposição que o conteúdo preceptivo de um fenômeno revela-se em sua plenitude (HEISENBERG, 1996, p. 97).

Isso significa que para um mesmo fenômeno físico há duas descrições possíveis e que ambas são necessárias para se representar completamente o sistema. Desta forma,

[...] os dados obtidos em diferentes condições experimentais não podem ser compreendidos dentro de um quadro único, mas devem ser considerados *complementares* no sentido de que só a totalidade dos fenômenos esgota as informações possíveis sobre os objetos (BOHR, 1995, p. 51).

A rápida ascensão da interpretação de Copenhague ao *status* de interpretação 'quase incontestável' da FQ pode ser explicada, de acordo com Balsas e Videira (2013), a partir de três aspectos. O primeiro deles se refere à existência do Instituto de Bohr para Física Teórica na Universidade de Copenhague, que serviu como um atrator de jovens talentosos da Europa, Estados Unidos e Ásia e que, posteriormente, contribuíram para a difusão dos aspectos teóricos da FQ de acordo com os preceitos da escola de Copenhague. Em segundo lugar, vários colaboradores de Bohr ocuparam importantes posições acadêmicas na Europa Central, assim como na extinta União Soviética, Japão e Estados Unidos, levando a filosofia de Copenhague a diversas outras instituições. Finalmente, cabe destacar o comprometimento de Bohr, Heisenberg e Pauli que, apesar de divergências conceituais, mantiveram-se unidos na defesa do 'núcleo duro' da interpretação de Copenhague, apoiados no princípio da complementaridade.

A interpretação de Copenhague encontrou em Einstein o seu principal opositor, desde o primeiro²⁹ debate Einstein-Bohr, em 1927, até, pelo menos, o início dos anos

asserção da causalidade (BOHR, 1928; 1937; 1948). Estas acepções da complementaridade podem ser melhor estudadas no capítulo XIII de Pessoa Jr. (2005) e em Greenstein e Zajonc (2006).

²⁹ Einstein e Bohr já haviam se encontrado, pelo menos, duas vezes, em 1920 (Berlim) e 1923 (Copenhague) e trocado cartas antes deste embate de ideias mais sério ocorrido em Solvay, entretanto, o que ficou conhecido como 'debates Einstein-Bohr' foram os encontros de 1927 e 1930, nos congressos de Solvay e o artigo de 1935, onde é apresentado o paradoxo EPR, que será explorado mais detalhadamente na seção 2.4.

1950. Entre as demais vozes que se manifestavam contrárias à ideologia de Copenhagen destacam-se David Bohm, com a teoria das variáveis ocultas, Hugh Everett, defensor da teoria dos estados relativos e Eugene Wigner, que revisita o processo de medição e inclui a consciência humana. Ainda podem-se incluir neste grupo físicos e filósofos soviéticos, que dirigiram duras críticas à epistemologia de Bohr, cujo conceito de complementaridade introduziria o idealismo na Física e, portanto, seria contrário ao materialismo dialético; John Bell, cujos trabalhos³⁰ reacenderam a discussão em torno da localidade na FQ; Gell-Mann, Robert Griffiths e Wojciech Zurek, que defenderam uma interpretação conhecida como Histórias Consistentes.

Nessa tese, não é dado maior aprofundamento a todos esses debates ou pormenores de cada interpretação a fim de não sobrecarregar o texto. A abordagem aqui realizada visa tão somente situar o leitor em torno dessas interpretações, evidenciando posturas filosófico-epistemológicas subjacentes a cada uma delas.

2.3.2 Interpretação das Histórias Consistentes

A interpretação das histórias consistentes, também conhecida como histórias decoerentes, consiste em uma proposta de retomar e ampliar a interpretação de Copenhagen e dar um caráter universal à FQ. Sua aplicação, seja a sistemas diminutos como um átomo ou de grandes proporções, como uma estrela, possibilitaria a obtenção da Mecânica Clássica (dinâmica e lógica clássicas e o determinismo) sem incluir a noção de colapso de função de onda, mas recorrendo à estrutura matemática mínima da interpretação de Copenhagen, como o espaço de Hilbert (PINTO NETO, 2010). Esta interpretação foi desenvolvida, inicialmente por Robert Griffiths, nos anos 1980, onde este propõe critérios matemáticos que permitem o uso de regras clássicas de probabilidade.

A interpretação das histórias consistentes passou a integrar uma teoria cosmológica, com Roland Omnès, ainda na mesma década e, atualmente, tem em Gell-Mann (que propôs a atribuição de probabilidades clássicas a sistemas quânticos com decoerência) mais um dos seus defensores. Omnès reconhecia deficiências no trabalho de Bohr em função do uso da Física Clássica para explicação de resultados experimentais mas, por outro lado, via com bons olhos o fato de a interpretação ortodoxa criar novos problemas. Seu trabalho consistiu em promover uma reformulação da

³⁰ Ver Bell (1964; 1966).

interpretação de Copenhagen a partir de uma revisão dos fundamentos lógicos da FQ, o que lhe permitiu desenvolver uma lógica booleana para descrição dos sistemas (FREIRE JR., 2013b).

De modo geral, não se trata de admitir que quaisquer descrições são possíveis na FQ, ao contrário disso, procura-se estabelecer famílias de histórias³¹ consistentes e, nesse conjunto, critérios que permitam analisar probabilidades de histórias, ou sequências, de eventos. Estas famílias representam um conjunto de possibilidades que são mutuamente excludentes e que devem satisfazer condições de consistência. Sobre as famílias de histórias consistentes é possível atribuir probabilidades, conforme determina a teoria quântica. O objeto de estudo nessa interpretação são as sequências de eventos onde cada evento corresponde a um operador de projeção no espaço de Hilbert, que descreve o sistema como um todo, e tem sua evolução temporal representada por transformações unitárias (OMNÈS, 1994).

A interpretação das histórias consistentes busca descrever a FQ relegando o observador e a medição a um papel secundário. O estado quântico de um sistema tem significado físico, independentemente da existência de um observador, entretanto, a realidade objetiva que almeja alcançar depende da lógica que o observador escolhe para descrever o sistema físico. Essa nova abordagem resolvia as dificuldades conceituais relacionadas tanto aos aparelhos clássicos de Bohr quanto ao observador consciente de von Neumann e Wigner.

Segundo essa interpretação, um aparelho, desde que seja adequadamente construído, pode revelar propriedades que um sistema possuía antes da medição e que perderia neste processo. Nesse caso, a escolha de uma família de histórias pode revelar as propriedades que ‘realmente’ existiam, sem incorrer nas dificuldades conceituais impostas pelo colapso da função de onda, como faz a interpretação de Copenhagen.

Resgatando o tema de interesse mais imediato à pesquisa tratado neste capítulo, pode-se resumir que a complementaridade onda-partícula, conforme proposta por Bohr, no que se refere a arranjos experimentais traduz a impossibilidade de se observar em um arranjo experimental, ao mesmo tempo, os fenômenos associados a estas duas descrições. Esse princípio pode ser explicado a partir da simulação com o IVMZ, um dos

³¹ O termo ‘história’ é aqui reconhecido como uma série de propriedades que ocorrem em uma sequência ordenada de instantes de tempo (OMNÈS, 1992).

objetivos da intervenção didática que realizamos no âmbito da pesquisa aqui descrita. O outro conceito envolvido nessa pesquisa foi o emaranhamento quântico, explorado na próxima seção.

2.4 O emaranhamento quântico e os debates mais recentes

Em um artigo publicado em 1935, Einstein e seus colaboradores Boris Podolsky e Nathan Rosen apresentaram um experimento mental, envolvendo sistemas de pelo menos dois objetos quânticos, em que colocavam em dúvida se a teoria quântica seria completa (EINSTEIN, PODOLSKY e ROSEN, 1935)³². Defendiam que, para uma descrição completa da realidade física, a FQ deveria admitir a existência de variáveis escondidas, considerada por estes como a única forma de evitar os efeitos radicalmente não-locais que emergiam como resultados do experimento mental proposto (GREENSTEIN e ZAJONC, 2006). O assim chamado paradoxo EPR foi apresentado à comunidade científica, causando grande alvoroço.

Tal experimento mental consistiu basicamente em um sistema onde a medição de observáveis incompatíveis em uma parte deste sistema conduzia a uma situação em que estes mesmos observáveis poderiam coexistir em outra parte, mesmo que muito afastada e com autovalores bem definidos. Em uma descrição simples, considere-se dois objetos quânticos, 1 e 2, que estão correlacionados e num dado momento são levados para longe um do outro. O formalismo da FQ permite descrever o estado quântico desse sistema com dois objetos quânticos em termos de uma superposição dos vários estados possíveis desse sistema e o processo de medição permitirá obter os autovalores associados a cada um desses estados do sistema. Para simplificar, utilizando uma descrição atual, pode-se supor que os estados possíveis para cada objeto quântico sejam dois, denominados $|\alpha\rangle$ e $|\beta\rangle$, e que o vetor de estado do sistema emaranhado seja descrito pela superposição linear $|\Psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}|\alpha\rangle_1 \otimes |\beta\rangle_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}|\alpha\rangle_2 \otimes |\beta\rangle_1$. Assim, se uma medição no objeto 1 resulta num autovalor α (correspondendo ao estado $|\alpha\rangle$),

³² De acordo com Fine (1986) a redação final do artigo foi de Podolsky e a forma como o questionamento à completeza da teoria quântica foi apresentado não teria agradado Einstein, cujo objetivo não era questionar se a teoria estava completa, mas mostrar que ela não poderia estar completa e, ao mesmo tempo, admitir que os estados dos objetos quânticos separados espacialmente eram independentes um do outro.

invocando o critério estabelecido por EPR - segundo o qual uma condição suficiente para a realidade de uma quantidade física é a possibilidade de predizê-la com certeza, sem perturbar o sistema - pode-se dizer que o objeto 2 está, com certeza, no estado $|\beta\rangle$. Nesse caso, esta informação é obtida de forma indireta, pois não houve de fato uma medição sobre o objeto 2. Essa redução de estado, decorrente da medição em um dos dois objetos quânticos correlacionados, define instantaneamente o estado do outro (não importando a distância entre ambos), e está prevista no próprio corpo teórico da teoria quântica (no formalismo matemático e por meio do postulado da superposição), consistindo em um fenômeno contraintuitivo e fortemente não-local. Evidentemente, a propagação de informação, de forma que um objeto assuma instantaneamente um estado em termos de uma medida feita sobre o outro objeto distante, não seria aceitável considerando-se a teoria da relatividade restrita.

Os defensores da Escola de Copenhague perceberam a ameaça que o paradoxo EPR representava, de modo que imediatamente responderam às afirmações de Einstein, Podolsky e Rosen. No volume seguinte de *Physical Review*, periódico onde foi publicado o paradoxo EPR, Bohr publicou um artigo com o mesmo título daquele que tentara colocar em xeque sua teoria: “*Can Quantum-Mechanical description of physical reality be considered complete?*” (BOHR, 1935). Além de afirmar que o paradoxo EPR era ambíguo, Bohr saiu em defesa³³ da complementaridade, afirmando não haver nenhuma inconsistência na descrição que a mesma oferece, uma vez que satisfaz todas as exigências racionais de completude. Portanto, o paradoxo EPR não representaria nenhum desafio de ordem prática para a aplicação da teoria quântica em problemas físicos reais.

Bohm, em 1951, recriou o experimento de pensamento de EPR considerando a medição de spin em dois átomos resultantes da desintegração de uma molécula com spin zero. Isto consistia numa versão equivalente ao experimento original de 1935, uma vez que os operadores de spin em quaisquer duas direções (em eixos distintos) não

³³ Aczel (2001) afirma que Bohr falou sobre os argumentos apresentados no paradoxo EPR até o dia de sua morte e “rebateu cada ataque na teoria como se fosse uma questão pessoal” (p. 122). Talvez este traço marcante de sua personalidade, aliado às ‘vitórias’ sobre Einstein na série de debates que travaram, tenham sido, juntamente com os fatores apontados, decisivos para que a interpretação de Copenhague se mantivesse como dominante, num período que Jammer (1974) chama de monocracia da Escola de Copenhague.

comutam e independente da direção ao longo da qual ocorresse a medição, os átomos teriam spin simétricos (BOHM, 1989).

Anos se passaram até que Bell (1964) reavaliou o paradoxo EPR. Para isso, formulou um teorema, que leva seu nome, obtendo desigualdades que, quando violadas, mostravam, em resumo, que as teorias locais de variáveis escondidas não podem descrever os sistemas quânticos, conforme escrito anteriormente, permitindo mais tarde que fossem concebidos experimentos que pudessem explorar a controvérsia colocada pelo paradoxo EPR.

O trabalho de Bell teve pouquíssima repercussão inicial, mas um grupo de físicos³⁴ se debruçou sobre este e acabou propondo uma desigualdade derivada desse teorema, hoje conhecida como CHSH (CLAUSER *et al.*, 1969), que pode ser testada em laboratórios de óptica quântica. A série de três trabalhos do grupo de Alain Aspect mostrou que essas desigualdades eram violadas pela FQ, o que representava a impossibilidade da existência de teorias locais de variáveis ocultas que descrevessem os sistemas quânticos (ASPECT, DALIBARD e ROGER, 1982a; 1982b; ASPECT, GRANGIER e ROGER, 1981).

Com a percepção de que o formalismo da FQ previa esse estranho efeito, mais tarde chamado de emaranhamento³⁵ e que estava por trás da violação das desigualdades de Bell, novamente a teoria quântica mostrava seu caráter enigmático e completamente não intuitivo. A partir desse ponto, viu-se que o emaranhamento era ‘um novo mistério’ que não poderia ser reduzido à dualidade onda-partícula, consistindo de fato no segundo aspecto fundamental da FQ, que deflagrou a chamada segunda revolução quântica (ASPECT, 2006).

O emaranhamento é um conceito relativamente novo na FQ e compõe a sua agenda atual de pesquisa já tendo, inclusive, contribuído para aplicações no campo da informação quântica (BERTLMANN e ZEILINGER, 2002; FARÍAS *et al.*, 2009; FUWA *et al.*, 2014; JENNEWEIN *et al.*, 2000; KWIAT *et al.*, 1995; LEMOS *et al.*, 2014; PAN *et al.*,

³⁴ São eles: John Clauser, Richard Holt, Abner Shimony e Michael Horne (a sigla CHSH vem dos sobrenomes). O trabalho de Freire Jr. (2006) faz uma análise aprofundada de todo o processo que elevou o emaranhamento quântico ao patamar de um tema de fronteira em FQ.

³⁵ Bub (2015) escreve que, Schrödinger, ao se referir ao fato de que os estados quânticos em sistemas tais como o do paradoxo EPR não podem ser tratados isoladamente teria argumentado que “[...] não chamaria isso de um, mas sim o traço característico da mecânica quântica, o que reforça todo o seu afastamento de linhas clássicas de pensamento. Pela interação dos dois representantes [os estados quânticos] tornam-se emaranhados.”

2000; PAN *et al.*, 1998; TADDEI *et al.*, 2013; WALTHER *et al.*, 2005; ZHANG *et al.*, 2014).

3 A FÍSICA DO INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER

Neste capítulo é feita uma descrição do IVMZ do ponto de vista dos aspectos físicos a serem considerados na sua operação bem como de algumas potencialidades didáticas do *software*, exploradas nesta pesquisa.

3.1 Descrição quântica do Interferômetro de Mach-Zehnder

Nessa seção será feita uma descrição quântica do IMZ na sua situação mais simples (sem polaroides ou detectores posicionados nos braços do interferômetro). Apesar dessa configuração mais simples cobrir apenas parte das possibilidades do *software*, é importante ser apresentada para que seja entendida uma parte dos conceitos e procedimentos matemáticos que embasam esse trabalho. A teoria física mais completa que embasa a produção do *software* está sendo redigida em forma de artigos para serem submetidos a periódicos e não será apresentada aqui além da situação descrita acima, por questão de espaço. Também não será mostrada nesta tese a descrição clássica, considerando que a fonte emite um feixe de *laser*, ou seja, luz que pode ser aproximada como uma onda perfeitamente coerente e monocromática (além disso, é suposta que é linearmente polarizada). Nesse caso, padrões de interferência contínuos são formados nos anteparos (ver figura 1).

O IMZ foi desenvolvido, inicialmente, com vistas a trabalhar nesse regime clássico, por Ludwig Mach (1868-1951) e Ludwig Zehnder (1854-1949) no início dos anos 1890, de forma independente. Entre outras aplicações, este aparato é capaz de medir pequenos deslocamentos de fase entre dois componentes que percorrem caminhos com diferentes comprimentos. Tem sido largamente utilizado em interferometria com átomos, pesquisas ligadas à criptografia quântica, óptica quântica e emaranhamento quântico (ASPECT, GRYNBERG e FABRE, 2010; CABRAL, LIMA e LULA JR., 2004; CLEVE *et al.*, 1998; HAROCHE e RAIMOND, 2006; MERMIN, 2006).

A figura 1 também ilustra o esquema de montagem e os dispositivos que compõem um IMZ. Este dispositivo utiliza dois espelhos semirrefletores³⁶, chamados

³⁶ Estes dispositivos, com formato cúbico, são considerados simétricos (mesmo coeficiente de reflexão e transmissão independente se a incidência da luz se dá pela porta de entrada I ou II), não absorvem energia e tampouco alteram a polarização da luz.

divisores de feixe (*Beam Splitters*) BS_1 e BS_2 , que servem para, respectivamente, dividir e recombinar os componentes luminosos nos caminhos A e B. Após o primeiro divisor de feixe há dois espelhos (*Mirrors*) M_1 e M_2 , que direcionam para o divisor de feixe BS_2 os componentes luminosos separados no divisor de feixe BS_1 . Após o divisor BS_2 , há duas portas de saída nas quais se dá a detecção e podem ser posicionados detectores D_1 e D_2 (ou anteparos).

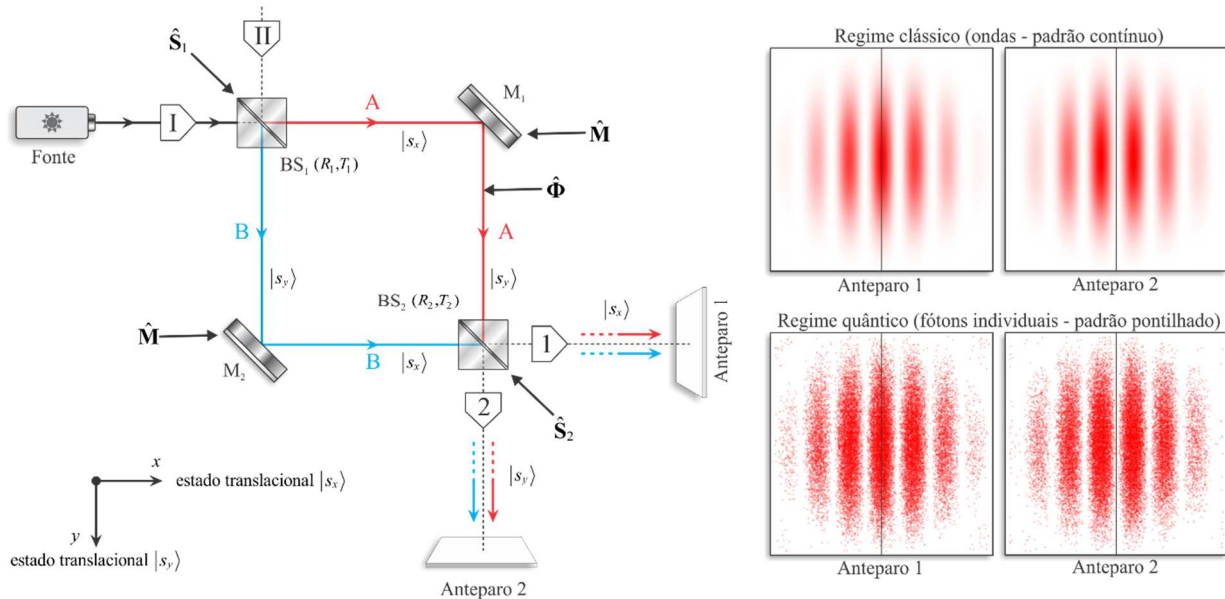


Figura 1: Representação esquemática do IMZ (esquerda) e os padrões de interferência formados nos anteparos quando ambos os divisores de feixe são balanceados (coeficientes de reflexão R_1 e R_2 – e, portanto, também os de transmissão $T_1 = 1 - R_1$ e $T_2 = 1 - R_2$ – iguais a $1/2$). São mostrados esses padrões nos regimes clássico e quântico. Há duas possíveis portas de entrada (I e II) e de saída (1 e 2), nas quais se posicionam dois anteparos (ou detectores de fótons). Uma linha vertical é mostrada nos padrões de interferência para ajudar a visualizar que os padrões nos anteparos 1 e 2 são invertidos entre si. Os operadores que representam cada dispositivo também são mostrados (são explicados ao longo do texto).

Cada reflexão nos espelhos introduz uma mudança de fase π na luz, de modo que isto corresponde, em termos de comprimento de onda λ , a uma diferença de caminho de $\lambda/2$ (POLLACK e STUMP, 2005, p. 502 e 510). Nos divisores de feixe, considerados simétricos, este deslocamento de fase é de $\pi/2$, correspondendo a uma diferença de caminho de $\lambda/4$ (DEGIORGIO, 1980) Dessa forma, verifica-se que, em ambos os componentes luminosos detectados em D_1 , as reflexões implicam um deslocamento de fase de $3\pi/2$, de modo que se obtém interferência construtiva na região central deste detector. Por outro lado, na região central de D_2 ocorre interferência destrutiva, visto que no componente vindo do caminho A o deslocamento de fase é π e

no componente vindo do caminho B é 2π . Essas mesmas mudanças de fase ocorrem se considerarmos fótons individuais incidindo no interferômetro.

No regime quântico, é exatamente isso que é suposto: a fonte emite um fóton por vez, que incide no interferômetro. Esses fótons interagem um a um com os dispositivos presentes no interferômetro e atingem os anteparos nas portas de saída. Gradativamente um padrão de interferência vai sendo construído ponto a ponto nesses anteparos (supondo que esses anteparos produzam uma marca pontual para cada fóton que nele incidir). Os vetores de estado $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$, mostrados na figura 1, são os chamados *estados translacionais* do fóton, em estrita analogia com as duas direções de propagação possíveis dentro do interferômetro³⁷. Como proposto por Dirac (1958, p. 7), cada fóton “está localizado em algum lugar na região do espaço através da qual o feixe está se propagando e possui seu *momentum* [linear] na direção desse feixe”. Convém esclarecer que com o uso da palavra *localizado*, Dirac não quer dizer de forma alguma que o fóton possui uma posição definida, tal qual uma partícula clássica. Ele, ao contrário, afirma que o fóton é deslocalizado espacialmente³⁸, mas pode ser detectado ao longo de um feixe propagando-se com uma direção mais ou menos definida. Assim, os estados translacionais $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$ são relacionados a estados de *momentum* do fóton – pode-se pensar cada um deles como descritos por uma superposição contínua de estados de *momentum*, descrita matematicamente como uma distribuição angular estreita desses estados de *momentum* em torno das direções x e y , respectivamente. Com isso, não se pode dizer que o fóton percorra uma trajetória retilínea nessas direções como uma partícula clássica. É fisicamente inconsistente descrever um feixe de fótons como um feixe perfeitamente colimado em uma dada direção após passar por uma fenda de dimensões finitas na saída da fonte.

Segundo essa notação de estados translacionais, se a fonte monofotônica estiver posicionada na porta de entrada I, como mostrado na figura 1, o estado translacional do

³⁷ Não foi usada a notação $|x\rangle$ e $|y\rangle$ para os estados translacionais, comumente utilizada na literatura, para não criar confusões desnecessárias com autoestados de posição. Note que esses estados translacionais são ortogonais e definem uma base no espaço de Hilbert de estados translacionais possíveis no interferômetro (ou seja, a descrição quântica do interferômetro de Mach-Zehnder pode ser feita em termos de um sistema de dois estados). Assim, pode-se tomar como válida a relação de completudeza $\hat{\mathbf{I}}_T = |s_x\rangle\langle s_x| + |s_y\rangle\langle s_y|$, onde $\hat{\mathbf{I}}_T$ é o operador identidade no espaço de estados translacionais.

³⁸ Localizado em *algum* lugar na região do espaço em que se propaga o feixe – ou seja, não possui localização definida ao longo do feixe, mas possui *momentum* relativamente bem definido.

fóton antes de interagir com o primeiro divisor de feixe será dado por $|\psi_{\text{in}}\rangle = |s_x\rangle$. A ação do primeiro divisor de feixe no estado translacional do fóton é descrita por um operador no espaço de Hilbert dos estados translacionais. Faremos a construção desse operador passo a passo.

3.1.1 O operador que representa a ação dos divisores de feixe

O operador que representa a ação de cada um dos divisores de feixe altera o estado translacional do fóton, inicialmente no estado $|s_x\rangle$ (se ele incide pela porta de entrada I) ou $|s_y\rangle$ (se ele incide pela porta de entrada II). Este operador transforma esse estado translacional em uma combinação linear dos dois estados translacionais possíveis $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$. Esta superposição linear está relacionada com os dois resultados possíveis da interação do fóton com o divisor de feixe: reflexão ou transmissão pelo respectivo divisor de feixe. O operador que representa a ação do divisor de feixe será denominado por \hat{S}_1 para o primeiro divisor de feixe e \hat{S}_2 para o segundo. A construção desse operador será feita para o primeiro divisor de feixe, cujas probabilidades de reflexão e transmissão são, respectivamente, R_1 e T_1 (classicamente, estes são entendidos como os coeficientes de reflexão e transmissão, respectivamente). Para o segundo divisor de feixe, basta substituir R_1 e T_1 por R_2 e T_2 , respectivamente.

O operador \hat{S}_1 deve incluir as possibilidades de reflexão e transmissão, como também as duas possibilidades de incidência (portas I ou II) para os fótons no interferômetro. Pode-se entender a construção da forma matemática deste operador por meio das seguintes afirmações:

- Supondo que o fóton incide na porta de entrada I, quando ele interage com o divisor de feixe, haverá uma amplitude de probabilidade de reflexão igual a r_1 e amplitude de probabilidade de transmissão igual a t_1 . A parte do operador \hat{S}_1 que descreve essa interação é $r_1|s_y\rangle\langle s_x| + t_1|s_x\rangle\langle s_x|$. Como $(r_1|s_y\rangle\langle s_x| + t_1|s_x\rangle\langle s_x|)|s_x\rangle = r_1|s_y\rangle + t_1|s_x\rangle$, isso significa que, se o fóton é refletido, seu estado translacional mudaria de $|s_x\rangle$ para $|s_y\rangle$ e, se ele é transmitido, seu estado translacional continua a ser descrito

pelo vetor de estado $|s_x\rangle$, ou seja, mantém-se inalterado. É importante enfatizar que as amplitudes de probabilidade r_1 e t_1 são números complexos.

- Quando o fóton incide na porta de entrada II, haverá uma amplitude de probabilidade de reflexão igual a r_1' e amplitude de probabilidade de transmissão igual a t_1' . Nesse caso, a parte do operador \hat{S}_1 que descreve essa interação com o divisor de feixe será descrita pelo operador $r_1'|s_x\rangle\langle s_y| + t_1'|s_y\rangle\langle s_y|$. Nesse caso, $(r_1'|s_x\rangle\langle s_y| + t_1'|s_y\rangle\langle s_y|)|s_y\rangle = r_1'|s_x\rangle + t_1'|s_y\rangle$. Isso significa que, se o fóton é refletido, seu estado translacional mudaria de $|s_y\rangle$ para $|s_x\rangle$ e, se ele é transmitido, seu estado translacional continua a ser descrito pelo vetor de estado $|s_y\rangle$. Se o divisor de feixe não é simétrico, $r_1 \neq r_1'$ e $t_1 \neq t_1'$.

Os divisores de feixe cúbicos, mostrados na figura 1, são constituídos de dois prismas triangulares retos e isósceles, com um revestimento de uma película semirrefletora prensada entre as hipotenusas (este filme é geralmente multicamada, garantindo uma mudança de fase no feixe refletido). Uma vez que estes divisores de feixe são simétricos, o operador \hat{S}_1 deve contemplar as duas declarações acima. Assim, \hat{S}_1 pode ser obtido somando as duas partes citadas acima e considerando a simetria dos divisores de feixe, ou seja, $r_1 = r_1'$ e $t_1 = t_1'$:

$$\hat{S}_1 = r_1(|s_y\rangle\langle s_x| + |s_x\rangle\langle s_y|) + t_1(|s_x\rangle\langle s_x| + |s_y\rangle\langle s_y|) = r_1(|s_y\rangle\langle s_x| + |s_x\rangle\langle s_y|) + t_1\hat{I}_T. \quad (1)$$

Tal resultado é válido somente para os divisores de feixe simétricos. Denomina-se como $|\psi_{BS_1}^I\rangle$ o estado translacional do fóton após sua interação com o primeiro divisor de feixe, sabendo que a incidência se dá pela porta de entrada I. Obtém-se:

$$|\psi_{BS_1}^I\rangle = \hat{S}_1|s_x\rangle = r_1|s_y\rangle + t_1|s_x\rangle.$$

Assim, percebe-se que o divisor de feixe matematicamente é descrito por um operador que transforma um estado translacional $|s_x\rangle$ em uma superposição linear dos dois estados translacionais possíveis ou, em outras palavras, *prepara* o fóton em uma superposição linear dos estados translacionais possíveis no interferômetro. O estado

$|\Psi_{BSI}^I\rangle$ é conhecido como um estado intermediário do fóton no interferômetro, assumido após sua interação com o primeiro divisor de feixe. O fóton não possui mais um estado translacional definido, mas um estado translacional que possui ambas as características translacionais $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$, como afirmam Brom e Rioux (2002, p. 203). Caso seja inserido um detector de fótons em um dos braços do interferômetro (por exemplo, no braço A), apenas uma dessas duas características translacionais será revelada a cada medição. Nesse caso, o detector terá uma probabilidade $T_1 = t_1^* t_1$ de acusar o fóton (com o estado do fóton colapsando para $|s_x\rangle$, logo após o primeiro divisor de feixe – correspondendo ao braço A). Obviamente, nessa configuração haverá uma probabilidade de não acusar o fóton, igual a $R_1 = r_1^* r_1$, correspondendo à reflexão, levando o estado translacional do fóton a colapsar para $|s_y\rangle$ (correspondendo ao braço B do interferômetro). Não é correto pensar como se o fóton pudesse ser ‘dividido’ pelo primeiro divisor de feixe nesse processo, sendo parcialmente refletido (mudando seu estado translacional inicial para $|s_y\rangle$) e parcialmente transmitido (mantendo esse estado translacional inicial inalterado). Há evidências experimentais apoiando a indivisibilidade dos fótons (GALVEZ *et al.*, 2005; GRANGIER, ROGER e ASPECT, 1986; THORN *et al.*, 2004). Fótons são, de fato, *quanta* indivisíveis de energia.

Os dois eventos decorrentes da interação com o primeiro divisor de feixe, reflexão e transmissão, são randômicos, ou seja, não é possível prever com certeza se o fóton será refletido ou transmitido. Sabemos apenas as probabilidades de ocorrência R_1 e T_1 desses dois eventos, mutuamente excludentes. Assim, após um grande número N_F de fótons incidir no primeiro divisor de feixe provenientes da porta de entrada I, aproximadamente uma fração $R_1 N_F$ será refletida e uma fração $T_1 N_F$ será transmitida, sendo acusada pelo detector (lembrando, posicionado no braço A). Considera-se que o divisor de feixe, além de ser simétrico, não absorve fótons. Nesse caso, a soma dessas frações, obviamente, será igual a N_F , o que acarreta em $R_1 + T_1 = 1$ (conservação de probabilidade ou do número de fótons – análoga à conservação de energia da onda, no regime clássico, na qual as intensidades das componentes refletida e transmitida pelo divisor de feixe são somadas e resultam na intensidade da onda incidente). A suposição

de que o divisor de feixe não absorve fótons tem uma importante consequência, que será vista a seguir.

3.1.2 Propriedades do operador \hat{S}_1

Se é suposto que os divisores de feixe não absorvem fótons, a soma das probabilidades de reflexão e transmissão é obviamente igual à unidade ($R_1 + T_1 = 1$) e o número de fótons se conserva nas sucessivas interações com o divisor de feixe, como afirmado ao final da seção anterior. Se os divisores de feixe não absorverem energia do feixe incidente, a mesma é conservada e temos $R_1 + T_1 = 1$, em analogia com o caso quântico. O fato de que a probabilidade é conservada mostra que o operador que representa o divisor de feixe é *unitário* (uma importante classe de operadores na FQ) e realiza o que se chama de *transformação unitária* sobre o estado de translação do fóton incidente. Sendo \hat{S}_1 unitário, seu adjunto \hat{S}_1^\dagger é igual ao seu operador inverso \hat{S}_1^{-1} e $\hat{S}_1^\dagger \hat{S}_1 = \hat{S}_1^{-1} \hat{S}_1 = \hat{I}_T$. Pode-se mostrar que:

$$\hat{S}_1^\dagger \hat{S}_1 = (\eta_1^* t_1 + \eta_1 t_1^*) (|s_x\rangle\langle s_y| + |s_y\rangle\langle s_x|) + (R_1 + T_1) \hat{I}_T.$$

A condição $\hat{S}_1^\dagger \hat{S}_1 = \hat{I}_T$ leva às identidades $R_1 + T_1 = 1$ e $\eta_1^* t_1 + \eta_1 t_1^* = 0$. A identidade $R_1 + T_1 = 1$ já foi discutida, mas a segunda leva a uma conclusão adicional. Se η_1 e t_1 são escritos na forma polar complexa, a condição $\eta_1^* t_1 + \eta_1 t_1^* = 0$ leva a:

$$\sqrt{R_1} e^{i\delta_{r1}} \sqrt{T_1} e^{-i\delta_{t1}} = -\sqrt{R_1} e^{-i\delta_{r1}} \sqrt{T_1} e^{i\delta_{t1}}, \quad (2)$$

onde δ_{r1} e δ_{t1} são, respectivamente, as fases absolutas do fóton refletido e transmitido, após sua interação com o primeiro divisor de feixe. Como $-1 = e^{i\pi}$, pode-se escrever a equação (2) como $e^{i(\delta_{r1} - \delta_{t1})} = e^{i(\pi - \delta_{r1} + \delta_{t1})}$. Logo, obtém-se:

$$\delta_{r1} - \delta_{t1} = \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Esta equação diz que a diferença de fase entre o fóton refletido e transmitido por um divisor de feixe simétrico é $\pi / 2$. Isto é uma consequência da operação realizada por \hat{S}_1 sobre o estado translacional inicial do fóton ser unitária e está intimamente relacionado com a *conservação de probabilidade*. Classicamente, este mesmo resultado

foi demonstrado nos trabalhos de Degiorgio (1980) e Hamilton (2000), como consequência da conservação da energia da onda quando ela interage com um divisor de feixe simétrico e não absorvente. O mesmo resultado para o regime monofotônico foi obtido, de forma um pouco distinta da apresentada aqui, nos trabalhos de Zeilinger (1981), Luis e Sanchez-Soto (1995) e Holbrow *et al.* (2002), entre outros. Se o divisor de feixe não for simétrico, a equação (3) é generalizada para uma forma um pouco mais complicada (HOLBROW, GALVEZ e PARKS, 2002; ZEILINGER, 1981).

Assim, pode-se escolher $\delta_{t_1} = 0$, o que leva a $\delta_{r_1} = \pi/2$. Nesse caso, $r_1 = e^{i\pi/2}\sqrt{R_1} = i\sqrt{R_1}$ e $t_1 = \sqrt{T_1}$, ou seja, o operador que representa a ação do primeiro divisor de feixe é dado por:

$$\hat{S}_1 = i\sqrt{R_1} (|s_y\rangle\langle s_x| + |s_x\rangle\langle s_y|) + \sqrt{T_1} \hat{I}_T. \quad (4)$$

Analogamente, o operador que representa a ação do segundo divisor de feixe é dado por $\hat{S}_2 = i\sqrt{R_2} (|s_y\rangle\langle s_x| + |s_x\rangle\langle s_y|) + \sqrt{T_2} \hat{I}_T$.

A construção dos operadores que representam cada dispositivo do IMZ é um dos pontos-chave da abordagem quântica para estabelecer uma ligação com os fenômenos que ocorrem no interferômetro. Os divisores de feixe têm um papel crucial na interferência quântica nas saídas do interferômetro: o primeiro divisor de feixe prepara o fóton em um estado de superposição dos possíveis estados translacionais. O segundo, se estivesse ausente, tornaria possível distinguir perfeitamente o caminho associado ao fóton no interferômetro (braço A ou B), o que eliminaria completamente a interferência.

3.1.3 O operador que representa a ação do espelho

A ação do espelho configurado em um IMZ consiste em alterar o estado translacional do fóton de $|s_x\rangle$ para $|s_y\rangle$ e vice versa. Como já dito na seção anterior, assume-se que ele insere uma mudança de fase π no processo de reflexão do fóton. Logo:

$$\hat{M} = e^{i\pi} (|s_y\rangle\langle s_x| + |s_x\rangle\langle s_y|) = -|s_y\rangle\langle s_x| - |s_x\rangle\langle s_y|.$$

Como a fase π é uma fase global, ela não terá a mínima influência quando forem calculadas as distribuições de probabilidade de incidência dos fótons nos anteparos. Ainda assim, por questões didáticas, essa fase será mantida. É possível mostrar que

$\hat{M}|s_x\rangle = -|s_y\rangle$ e $\hat{M}|s_y\rangle = -|s_x\rangle$. Este operador é também unitário³⁹, além de ser hermitiano, atuando uma vez em cada braço do interferômetro.

3.1.4 Diferença de fase devido à existência de dois braços no interferômetro (diferença de caminho)

Como mostrado na figura 1, existem dois braços no interferômetro, ou seja, há duas possibilidades para o fóton (análogo ao que ocorre em um sistema de dupla fenda – é possível mostrar que o IMZ é equivalente a um sistema de dupla fenda, um para cada anteparo). Será suposto que o braço A introduz uma fase φ e o braço B não (lembrando que é a diferença de fase, ou fase relativa, que produz interferência). A fase φ pode ser definida como “a diferença de fase entre dois caminhos semiclássicos passando por cada braço” do interferômetro (OMNÈS, 1992, p. 371) e terminando em algum ponto do anteparo – sendo que cada ponto do anteparo corresponde a um diferente valor de φ .

Essa característica pode ser atribuída ao braço A por meio de um operador, que será denominado $\hat{\Phi}$. Supondo que a ação deste operador ocorra após a ação dos espelhos, como mostrado na figura 1, pode-se inferir sua forma matemática. Após os espelhos, o estado translacional relacionado com o braço A do interferômetro é $|s_x\rangle$. Assim, o operador $\hat{\Phi}$ deve conter dois termos com duas ações distintas: um projeta o estado translacional do fóton em $|s_x\rangle$ e não insere fase; outro projeta em $|s_y\rangle$ e insere uma fase φ . Assim, ele pode ser escrito como:

$$\hat{\Phi} = |s_x\rangle\langle s_x| + e^{i\varphi}|s_y\rangle\langle s_y| \quad (5)$$

Construído com os requisitos acima, este operador deve atuar após o operador \hat{M} . Esse operador é também unitário.

3.1.5 A ação do interferômetro de Mach-Zehnder e a interferência quântica nas portas de saída, na ausência de detectores

Todos esses operadores construídos anteriormente agem sobre o estado inicial do fóton (descrito pela sigla *in*, de *input*) transformando-o em um estado final (descrito

³⁹ Pode-se mostrar tal característica realizando o seguinte procedimento: $\hat{M}^\dagger\hat{M} = \hat{M}\hat{M} = (-|s_y\rangle\langle s_x| - |s_x\rangle\langle s_y|)(-|s_y\rangle\langle s_x| - |s_x\rangle\langle s_y|) = |s_x\rangle\langle s_x| + |s_y\rangle\langle s_y| = \hat{I}_T = \hat{M}^{-1}\hat{M}$.

pela sigla *out*, de *output*), na medida em que o fóton interage com os componentes do interferômetro. Esta alteração, em cada braço, ocorre na seguinte ordem: pela ação do primeiro divisor de feixe, do espelho, da mudança de fase e, finalmente, do segundo divisor de feixe. Portanto, a ação do interferômetro sobre o estado translacional do fóton é descrita por um operador \hat{Z} , que é dado pela ação sucessiva dos operadores definidos na seção anterior. Assim, $\hat{Z} = \hat{S}_2 \hat{\Phi} \hat{M} \hat{S}_1$ e sua ação sobre o estado translacional inicial do fóton pode ser matematicamente escrita como $\hat{Z}|s_x\rangle = \hat{S}_2 \hat{\Phi} \hat{M} \hat{S}_1|s_x\rangle$, para um fóton que incida pela porta I e $\hat{Z}|s_y\rangle = \hat{S}_2 \hat{\Phi} \hat{M} \hat{S}_1|s_y\rangle$, para um fóton que incida pela porta II. Em cada caso, a ação desses operadores ocorre no sentido da direita para a esquerda, obedecendo a ordem *primeiro divisor de feixe* \rightarrow *espelho* \rightarrow *mudança de fase* \rightarrow *segundo divisor de feixe*.

Se o estado inicial do fóton é $|\psi_{in}\rangle = |s_x\rangle$ (fóton incidindo pela porta de entrada I), o estado nas portas de saída será dado por $|\psi_{out}\rangle = \hat{Z}|\psi_{in}\rangle$. As etapas a seguir mostram cada alteração (estados intermediários) do estado translacional inicial do fóton na medida em que ele interage com os dispositivos do interferômetro, até o estado final $|\Psi_{out}\rangle$:

$$\begin{aligned}
|s_x\rangle &\xrightarrow[1^\circ \text{ divisor de feixe}]{\hat{S}_1} i\sqrt{R_1}|s_y\rangle + \sqrt{T_1}|s_x\rangle \xrightarrow[\text{espelho}]{\hat{M}} -i\sqrt{R_1}|s_x\rangle - \sqrt{T_1}|s_y\rangle \\
&\xrightarrow[\text{mudança de fase}]{\hat{\Phi}} -i\sqrt{R_1}|s_x\rangle - e^{i\phi}\sqrt{T_1}|s_y\rangle \\
&\xrightarrow[2^\circ \text{ divisor de feixe}]{\hat{S}_2} -i\sqrt{R_1}(\sqrt{T_2}|s_x\rangle + i\sqrt{R_2}|s_y\rangle) - e^{i\phi}\sqrt{T_1}(i\sqrt{R_2}|s_x\rangle + \sqrt{T_2}|s_y\rangle)
\end{aligned} \tag{6}$$

Logo:

$$|\Psi_{out}\rangle = \hat{Z}|s_x\rangle = -i(\sqrt{R_1 T_2} + e^{i\phi}\sqrt{R_2 T_1})|s_x\rangle + (\sqrt{R_1 R_2} - e^{i\phi}\sqrt{T_1 T_2})|s_y\rangle. \tag{7}$$

3.1.6 Distribuição de probabilidades nos anteparos

No regime quântico do IMZ, como já dito, considera-se que o fóton atinge um determinado anteparo e nele produz uma marca puntiforme. Assim, um padrão de interferência é formado gradualmente até que se torne claramente visível (lado direito da figura 1). Sabe-se que a probabilidade de detectar um fóton em um dado ponto do anteparo é proporcional à intensidade neste ponto, ou seja, $P_1(\varphi) \propto I_1(\varphi)$ e $P_2(\varphi) \propto I_2(\varphi)$ (GIANCOLI, 2005, p. 788). Assim, a distribuição de marcas puntiformes nos anteparos

em cada tela tem forma análoga às intensidades, isto é, as marcas produzidas pelos fótons aparecem em maior número em regiões de maior intensidade do que nas regiões de menor intensidade (isso se torna evidente comparando-se os padrões clássico e quântico na figura 1).

Considerando que cada tela é subdividida em várias regiões quadradas muito pequenas, quando um fóton atinge esta pequena região ele produz uma pequena marca vermelha pontual, reforçada se fótons subsequentes atingem essa mesma região. Assim, pode-se conceber cada uma dessas pequenas regiões como um pequeno detector. A distribuição de probabilidade nos anteparos pode ser obtida calculando a probabilidade de que um fóton atinja um pequeno detector específico no anteparo. A FQ fornece uma maneira de fazer este cálculo: cada pequeno detector no anteparo 1 realiza uma medida do observável $\hat{\Pi}_x = |s_x\rangle\langle s_x|$. Este observável tem dois autovalores, 0 (sem detecção e sem marca produzida) e 1 (detecção de um fóton e uma marca vermelha puntiforme produzida). Assim, a distribuição de probabilidade na tela 1 é dada pelo valor esperado do observável $\hat{\Pi}_x$ no estado $|\psi_{\text{out}}\rangle$. Ou seja:

$$P_1(\varphi) = \langle \psi_{\text{out}} | \hat{\Pi}_x | \psi_{\text{out}} \rangle = R_1 T_2 + R_2 T_1 + 2\sqrt{R_1 R_2 T_1 T_2} \cos \varphi. \quad (8)$$

No anteparo 2, pode-se usar o mesmo raciocínio e mostrar que

$$P_2(\varphi) = \langle \psi_{\text{out}} | \hat{\Pi}_y | \psi_{\text{out}} \rangle = R_1 R_2 + T_1 T_2 - 2\sqrt{R_1 R_2 T_1 T_2} \cos \varphi, \quad (9)$$

onde $\hat{\Pi}_y = |s_y\rangle\langle s_y|$. Pode-se mostrar que φ varia ponto-a-ponto nos anteparos, produzindo uma sucessão de máximos e mínimos (padrão de interferência). Uma quantidade bastante importante que caracteriza os padrões formados nos anteparos é o chamado *contraste* ou *visibilidade*. Para o anteparo 1, temos

$$\mathcal{V}_1 = \frac{P_{1\text{max}} - P_{1\text{min}}}{P_{1\text{max}} + P_{1\text{min}}} = \frac{4\sqrt{R_1 R_2 T_1 T_2}}{R_1 T_2 + R_2 T_1}, \quad (10)$$

onde $P_{1\text{max}}$ ($P_{1\text{min}}$) é obtido fazendo $\cos \varphi = 1$ ($\cos \varphi = -1$) em (8) e $\cos \varphi = -1$ ($\cos \varphi = 1$) em (9). Para o anteparo 2, temos

$$\mathcal{V}_2 = \frac{P_{2\text{max}} - P_{2\text{min}}}{P_{2\text{max}} + P_{2\text{min}}} = \frac{4\sqrt{R_1 R_2 T_1 T_2}}{R_1 R_2 + T_1 T_2}. \quad (11)$$

As visibilidades podem assumir qualquer valor entre 0 e 1. Será nula quando $P_{i\max} = P_{i\min}$ ($i = 1, 2$), ou seja, não há regiões nas quais haja maior probabilidade de incidência de fótons do que outras – em outras palavras, não se forma padrão de interferência. Quando $P_{i\min} = 0$, ou seja, quando existirem regiões onde não há incidência de fótons, a visibilidade será máxima, ou seja, igual a 1. Quando os divisores de feixe são balanceados, ou seja, $R_1 = T_1 = 1/2$ e $R_2 = T_2 = 1/2$, é simples mostrar que o contraste é 1 em ambos os anteparos (esse é o caso mostrado na figura 1). Diversas razões podem afetar a visibilidade de um padrão de interferência e ela é uma quantidade importante de ser entendida também no regime clássico. Nos concentraremos aqui no regime quântico, no qual a perda de visibilidade tem interpretação física bastante distinta do regime clássico. No regime quântico a visibilidade decresce essencialmente quando há informação sobre o caminho associado ao fóton no interferômetro (relação de dualidade, como será visto mais adiante).

As relações (8) e (9) podem ser usadas também para estimar o número aproximado de fótons que atinge cada anteparo. Se a fonte emite N_F fótons, o número aproximado de fótons que atingem os anteparos 1 e 2, dado, respectivamente, por N_1 e N_2 , pode ser obtido fazendo-se uma média em um período de oscilação de $\cos\varphi$. Ou seja:

$$\begin{aligned} N_1 &\approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P_1(\varphi) N_F d\varphi = (R_1 T_2 + R_2 T_1) N_F; \\ N_2 &\approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} P_2(\varphi) N_F d\varphi = (R_1 R_2 + T_1 T_2) N_F. \end{aligned} \tag{12}$$

No caso em que ambos os divisores de feixe são balanceados, teremos $N_1 \approx N_F / 2$ e $N_2 \approx N_F / 2$. Como os eventos são probabilísticos, essa estimativa é aproximada e tende a ser melhor na medida em que mais fótons incidem no interferômetro – quanto maior o número N_F de fótons emitidos pela fonte, mais próximo N_1 será de $(R_1 T_2 + R_2 T_1) N_F$ e N_2 de $(R_1 R_2 + T_1 T_2) N_F$. Assim funciona a simulação – cada interação com o divisor de feixe tem um resultado aleatório (reflexão ou transmissão), mas que respeita as probabilidades definidas por (8) e (9). Quando há polaroides ou detectores nos braços do interferômetro, essas relações assumem formas bem mais complicadas. Não apresentaremos aqui as deduções matemáticas nesses casos, por

questão de espaço – como já dito, esses casos mais complexos (e mais interessantes) estão sendo redigidos em forma de artigos.

3.2 O Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

O IMZ foi proposto originalmente, como uma ferramenta didática para ensino de fundamentos da FQ, por Müller e Wiesner (2002), que desenvolveram um *software*⁴⁰ capaz de simular o funcionamento deste dispositivo. A proposta inovadora de Pessoa Jr. (1997) para uma abordagem conceitual da FQ faz uso deste dispositivo para ensino de alguns dos seus conceitos fundamentais em nível de graduação.

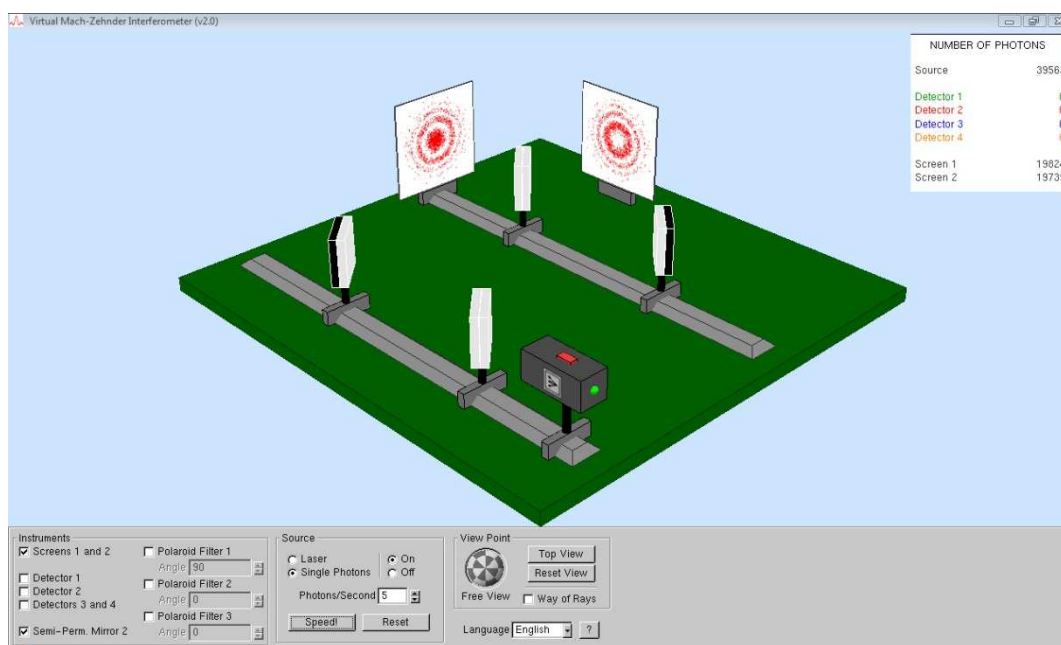


Figura 2: Captura de tela do *software* produzido entre os anos de 2004 e 2007. Nessa versão, os divisores de feixe eram balanceados e não se podia alterar essa configuração. A contagem de fótons também era bem mais simples, como se pode ver no quadro no canto superior direito (nomeado *número de fótons*). Nessa época foi adotada uma configuração em que o padrão de interferência era circular – por exemplo, supondo os comprimentos dos braços do interferômetro como levemente distintos.

Inspirados por estes trabalhos, foi desenvolvida uma versão melhorada do *software* produzido por Müller e Wiesner. Este *software*, o IVMZ⁴¹, foi desenvolvido no

⁴⁰ O *software* originalmente produzido pode ser obtido no endereço: <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/archiv/inhalt_materialien/interferometer/index.html>.

⁴¹ Este *software* foi desenvolvido originalmente em 2004 e 2005, tendo sido melhorado em 2007. A versão original pode ser obtida em: <<http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>>.

âmbito de um projeto de pesquisa com financiamento do CNPq e direcionado a pesquisas que envolviam o ensino de conceitos da FQ na formação de professores.

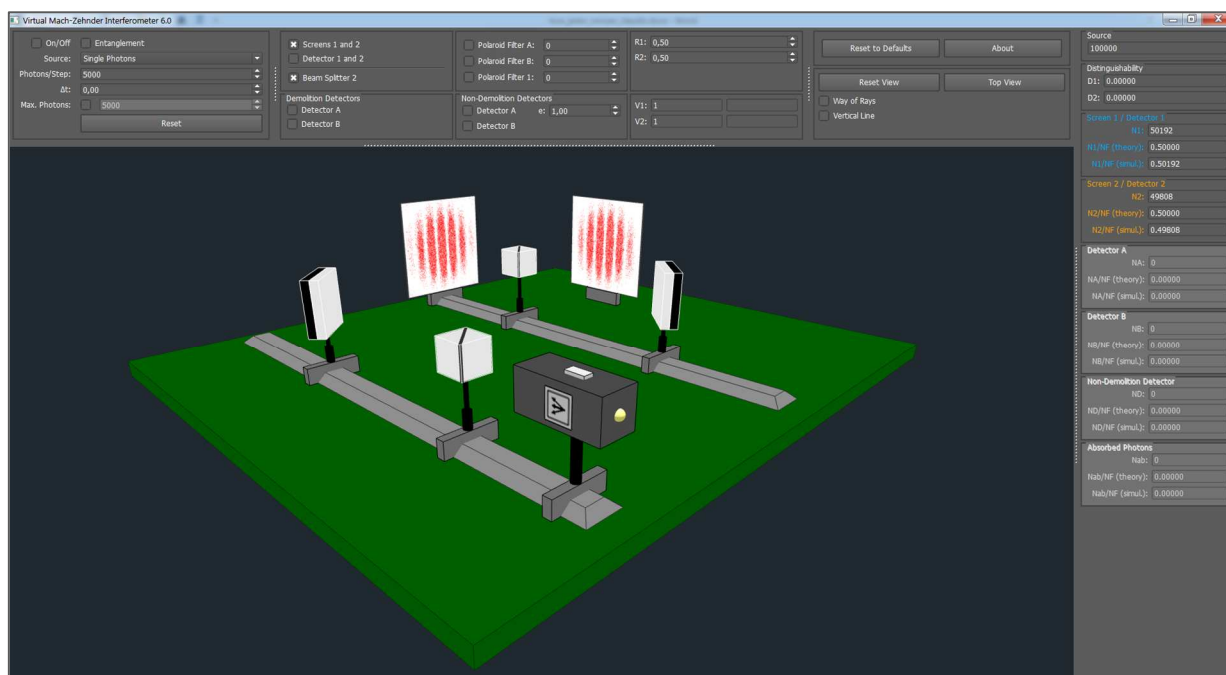


Figura 3: Captura de tela mostrando a versão atual do *software*, com a remodelagem implementada entre 2012 e 2014. Há mais possibilidades de configurações de parâmetros (parte superior) e uma área totalmente remodelada, chamada 'Photon Counters' (à direita), destinada ao regime quântico, onde muito mais detalhes são mostrados durante a execução da simulação do que aqueles que existiam na versão original, mostrada na figura 2. Os padrões de interferência obtidos nesta figura possuem visibilidade 1, pois os divisores de feixe foram configurados como balanceados. Os padrões nessa versão foram escolhidos para serem os mesmos do sistema de dupla fenda, mais familiar aos estudantes – esse padrão pode ser obtido mantendo iguais os comprimentos dos braços do interferômetro, mas aplicando uma pequena rotação nos dois espelhos.

O IVMZ tem sido utilizado na maioria das investigações realizadas ou coordenadas por professores do grupo *Pesquisa e inovação didática em ensino de Física sob a perspectiva sociocultural*, do Instituto de Física da UFRGS, voltados ao ensino de FQ (e. g. NETO, CAVALCANTI e OSTERMANN, 2014; NETO, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2014; NETO, OSTERMANN e PRADO, 2011; OSTERMANN, PRADO e RICCI, 2008; OSTERMANN e RICCI, 2005; PEREIRA, 2008; PEREIRA, CAVALCANTI e OSTERMANN, 2009; PEREIRA, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2009a; 2009b; PEREIRA *et al.*, 2012; RICCI, OSTERMANN e PRADO, 2007).

A continuidade desses estudos se deu por meio do projeto “O ensino de Física Quântica na perspectiva sociocultural e a formação de professores de Física”, com financiamento do CNPq (Edital Universal 014/2011). Durante a execução desse projeto foram implementadas diversas modificações no *software*. Essa versão remodelada foi

utilizada, além desta pesquisa, por Telichevesky (2015). A figura 2 apresenta uma captura da tela inicial do *software* produzido entre 2004 e 2007.

Na figura 3 é possível ter noção do estágio atual de desenvolvimento do *software*. Conforme pode-se perceber, além da mudança do *layout*, o *software* permite ao usuário comparar os valores previstos teoricamente para a contagem de fótons nos anteparos ou detectores com aqueles que são obtidos na simulação. Na barra superior do *software* é possível alterar os coeficientes de reflexão (e transmissão, portanto) em ambos os divisores de feixe, permitindo, assim, explorar novos conceitos, em especial a complementaridade entre os comportamentos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos. Além disso, o usuário pode simular uma remoção de cada divisor de feixe, simplesmente anulando o valor associado ao respectivo coeficiente de reflexão. Também é possível avaliar o comportamento dos fótons com a inserção de detectores não-demolição⁴² nos braços do interferômetro possibilitando, dessa forma, a abordagem de temas atuais de FQ relacionados aos processos de medição. Esse recurso não existia na versão elaborada entre 2004 e 2007.

Outra inovação no *software* é a indicação da visibilidade (\mathcal{V}_1 e \mathcal{V}_2) dos padrões de interferência e da distinguibilidade (\mathcal{D}_1 e \mathcal{D}_2). Como já dito, a visibilidade é uma quantidade que define o contraste ou nitidez do padrão de interferência nos anteparos, enquanto que a distinguibilidade- é relacionada à informação sobre o caminho (A ou B) associado ao fóton no interferômetro (JACQUES *et al.*, 2008). A visibilidade e a distinguibilidade quantificam propriedades complementares do fóton (e de qualquer objeto quântico), de modo que quanto mais informação estiver disponível sobre o caminho associado aos fótons no interferômetro, menor será a visibilidade do padrão de interferência (WALBORN *et al.*, 2002). Assim, a visibilidade pode ser encarada como uma medida do grau de comportamento ondulatório de um objeto quântico (capacidade de formar padrões de interferência). Por outro lado, ter um caminho A ou B associado pode ser entendido, classicamente, como ‘percorrer uma trajetória definida’ no interferômetro. Ou seja, a distinguibilidade pode ser encarada como uma medida do grau

⁴² O detector não-demolição é um dispositivo que detecta o fóton sem destruí-lo. Essa detecção ocorre a partir da absorção do fóton incidente e emissão de um fóton com o mesmo estado translacional. O fóton continua no mesmo autoestado após a medição, sem ocorrer uma perda líquida de energia. A presença desse detector no interferômetro não altera a distribuição de fótons entre os dois caminhos e anteparos (ou detectores) nas portas de saída. Entretanto, dependendo da sua eficiência, pode afetar bastante o padrão de interferência.

de comportamento corpuscular de um objeto quântico (GREENBERGER e YASIN, 1988).

Assim, o estudo da relação entre visibilidade e distinguibilidade pode ser feito com o uso dessa versão do interferômetro virtual tanto por meio de filtros polaroides, inserção de detectores não-demolição nos braços do interferômetro ou pela simples alteração dos coeficientes de reflexão nos divisores de feixe. Essas quantidades são essenciais para o estudo de uma classe de fenômenos que sequer é abordada em cursos introdutórios de FQ: os fenômenos de interferência quântica intermediária⁴³.

Durante a fase mais recente de desenvolvimento do *software*, iniciada no final de 2013, inseriu-se a simulação do emaranhamento quântico como uma nova possibilidade para o IVMZ. A simulação desse fenômeno pode ser realizada através de um experimento simples, criando-se um par de fótons em um estado emaranhado de polarização no IVMZ (NETO, CAVALCANTI e OSTERMANN, 2014). Na figura 6 pode-se visualizar o *layout* do *software* e um diagrama onde estão identificados os dispositivos para simulação do emaranhamento quântico.

Na pesquisa realizada no IFRS-BG, discutiu-se o princípio da complementaridade do segundo tipo, a partir da abordagem dos fenômenos intermediários, via simulação da interferência quântica no IVMZ, e o emaranhamento quântico. Na seção seguinte são discutidos com maiores detalhes estes e outros conceitos da FQ envolvidos nas simulações desses fenômenos.

3.3 Complementaridade onda-partícula no IVMZ

O princípio da complementaridade, conforme proposto por Bohr, pode ser explicado a partir da simulação com o IVMZ. Na figura 3 e no padrão inferior da figura 1, por exemplo, é mostrada uma situação experimental na qual o fóton exibe somente comportamento ondulatório, produzindo um padrão de interferência com visibilidade 1 em ambos os anteparos (ou seja, grau 100 por cento ondulatório).

Pode-se, nessas figuras, observar nos anteparos o resultado da detecção de um grande número de fótons de modo que se forma no anteparo 1 (esquerdo) um padrão

⁴³ A interferência intermediária (visibilidade menor do que 1) pode ser observada em situações nas quais se pode estimar corretamente (com probabilidade de acerto maior do que 50 por cento) qual o caminho associado a cada fóton que incide em cada anteparo.

de interferência onde há um máximo (interferência construtiva) na região central, enquanto que, nesta mesma região do anteparo 2 (direito) há um mínimo (interferência destrutiva).

A existência do padrão de interferência com visibilidade 1 manifesta uma natureza puramente ondulatória. Neste caso, nada se pode dizer sobre qual caminho está associado aos fótons que incidem em um ou outro anteparo (ou seja, há total ausência de informação sobre esse caminho). Qualquer tentativa de obter informação sobre esse caminho (com uso de detectores, por exemplo) no mínimo diminui a visibilidade do padrão de interferência. Essa ‘deslocalização’ do fóton no interferômetro e o conseqüente surgimento de padrão de interferência nos anteparos é um comportamento tipicamente ondulatório. Por outro lado, para o fenômeno ilustrado na figura 4, atribui-se um comportamento corpuscular para os fótons.

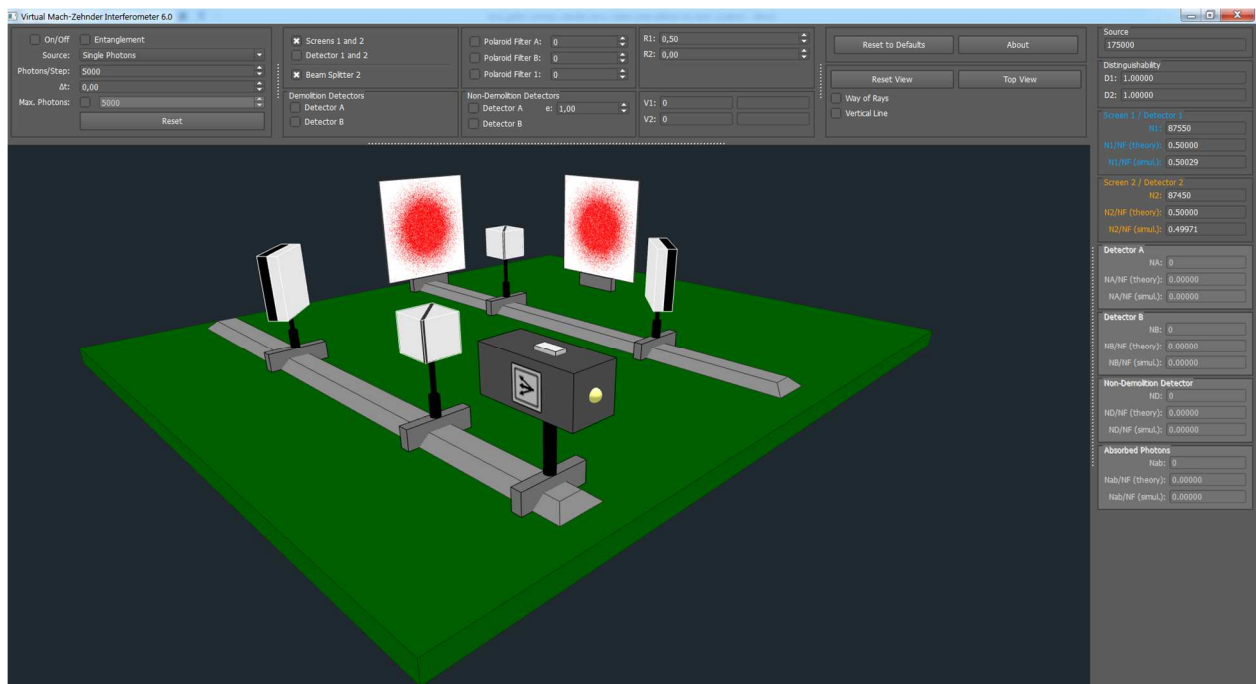


Figura 4: Destruição completa dos padrões de interferência nos anteparos (visibilidade nula). Para a obtenção dessas figuras, o coeficiente de reflexão do segundo divisor de feixe foi escolhido como nulo, ou seja, o de transmissão é 1. A probabilidade de o fóton ser refletido nesse divisor de feixe é nula, o que é o mesmo que retirá-lo do interferômetro.

Tornando o segundo divisor de feixe totalmente transmissor, ou seja, fazendo $R_2 = 0$, é possível associar com certeza um caminho para cada fóton, de modo que aqueles que incidem no anteparo 1 foram refletidos pelo primeiro divisor de feixe (seus estados translacionais estão, com certeza, associados ao caminho B) enquanto que os

fótons que incidem no anteparo 2 foram transmitidos pelo primeiro divisor de feixe (seus estados translacionais estão com certeza associados ao caminho A).

Pelo fato de se poder afirmar com total certeza o caminho associado aos fótons, típico comportamento corpuscular, diz-se que o caráter do fóton é corpuscular nessa situação, resultando na ausência completa de interferência (contraste, ou visibilidade, nula nos anteparos). No lado direito da figura, a contagem de fótons nos anteparos indica que estes se distribuem igualmente pelos dois caminhos, pois o coeficiente de reflexão do primeiro divisor de feixe (R_1) tem valor 0,5. Também se poderia inferir com total certeza o caminho associado aos fótons no caso em que o segundo divisor de feixe é balanceado e fazendo $R_1 = 0$ na simulação. Neste caso, todos os fótons estariam, com certeza, associados ao caminho A.

Nas situações descritas até o momento, nota-se a impossibilidade de conciliar, no mesmo experimento, um comportamento totalmente corpuscular e totalmente ondulatório do fóton, o que está plenamente de acordo com o princípio da complementaridade enunciado por Bohr. Por outro lado, cabe destacar que as situações exploradas se referem a casos extremos, nos quais se pode afirmar com total certeza o caminho associado pelos fótons (fóton exibe caráter corpuscular) ou não é possível afirmar nada acerca do caminho (fóton exibe caráter ondulatório).

Em livros de Física Moderna e Contemporânea bastante conhecidos (e. g. CARUSO e OGURI, 2006; EISBERG e RESNICK, 1979; TIPLER e LLEWELLYN, 2006), a interpretação que rege a descrição dos fenômenos quânticos baseia-se no princípio da complementaridade, embora este não seja abordado de forma explícita nas duas primeiras obras. Tipler e Llewellyn (2006), ao tratarem da experiência da dupla fenda com elétrons, descrevem que “os aspectos corpuscular e ondulatório são complementares. Ambos são necessários, mas **não podem ser observados simultaneamente** (p. 146) [grifo nosso]”. Apesar de fazer referência à complementaridade onda-partícula e este princípio ser a base para interpretação dos fenômenos descritos ao longo do livro, o mesmo explora apenas situações extremas, onde o fenômeno é somente ondulatório ou somente corpuscular. Situações intermediárias não são exploradas, sequer mencionadas.

As situações intermediárias são aquelas nas quais se pode fazer alguma inferência sobre o caminho e ainda assim obter um padrão de interferência bastante

discernível. Wootters e Zurek (1979) propuseram através de um experimento mental a existência dessas situações intermediárias. Para isso, fizeram uma análise quantitativa do experimento da dupla fenda e chegaram a situações onde não só se verificam as situações-limite, mas também casos em que se obtém um padrão de interferência observável e, ao mesmo tempo, informação parcial disponível acerca dos caminhos associados aos objetos quânticos. A simulação destes fenômenos com o IVMZ será discutida no capítulo 6.

Estudos realizados na década de 1980, com a finalidade de investigar como a informação acessível sobre o caminho associado ao objeto quântico em um experimento de dupla fenda (ou seja, a qual fenda ele estaria associado) alterava a figura de interferência, revelaram resultados surpreendentes. Um dos primeiros trabalhos com este objetivo foi desenvolvido por Scully e Drühl (1982), no qual propuseram um experimento destinado a investigar em que medida a informação acessível sobre o caminho afetaria os resultados medidos. Alguns anos mais tarde, Scully e Walther (1989) e Scully *et al.* (1991) argumentaram que é a informação contida no aparelho de medição (correlações quânticas), ao invés de alterações controláveis da função de onda, que altera o resultado da experiência. O experimento realizado por Dürr *et al.* (1998) buscou confirmar as previsões desses estudos. A conclusão obtida a partir deste experimento foi de que a destruição do padrão de interferência no experimento da dupla fenda não se devia ao princípio da indeterminação, tampouco à transferência de momento nas fendas. Desta forma, evidenciou-se que a complementaridade é independente do princípio da indeterminação e que teria um caráter mais fundamental, conforme afirmam Englert *et al.* (1994).

Isso sinaliza que a complementaridade é algo ainda mais fundamental do que Bohr imaginava, o que, por si só, justifica que a complementaridade seja um dos pontos de interesse dessa pesquisa. No entanto, apesar de tudo indicar que Scully *et al.* (1991) tenham obtido sucesso em mostrar essa elevação hierárquica da complementaridade em relação ao princípio da indeterminação, essa discussão ainda é polêmica e não terminou⁴⁴.

A forma quantitativa de expressar esse caráter complementar dos aspectos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos em um sistema de dupla fenda, IMZ ou

⁴⁴ Ver, por exemplo, Greenstein e Zajonc (2006).

análogos, pode ser sintetizada por uma desigualdade matemática, implicitamente contida no trabalho de Wootters e Zurek (1979), onde este propuseram um experimento mental. Essa desigualdade está demonstrada, de forma teórica e independente, em Jaeger *et al.* (1995) e Englert (1996), sendo expressa na relação

$$\mathcal{D}_i^2 + \mathcal{V}_i^2 \leq 1, \quad (13)$$

onde \mathcal{D}_i e \mathcal{V}_i são, respectivamente, a distinguibilidade e a visibilidade referentes ao anteparo i ($i = 1, 2$). No caso em que os objetos quânticos são todos preparados em um mesmo estado puro⁴⁵, a equação (13) se reduz à igualdade, ou seja

$$\mathcal{D}_i^2 + \mathcal{V}_i^2 = 1, \quad (14)$$

Como já citado, a distinguibilidade pode ser encarada como o grau de conhecimento sobre o caminho associado ao fóton, ou seja, algo que quantifica o seu caráter corpuscular. Por outro lado, a visibilidade pode ser encarada como algo que quantifica o caráter ondulatório. Assim, em uma situação hipotética na qual há um grau de conhecimento sobre caminho igual a 60 por cento (ou seja, $\mathcal{D}_i = 0,6$ e $\mathcal{V}_i = 0,8$), a situação complementar a essa seria quando o grau de conhecimento sobre o caminho fosse 80 por cento (ou seja, $\mathcal{D}_i = 0,8$ e $\mathcal{V}_i = 0,6$). Essas duas situações não aparecem simultaneamente no mesmo experimento, mas a expressão (14) mostra que nada impede que no mesmo experimento os caracteres corpuscular e ondulatório se manifestem⁴⁶. Essa é a essência do fenômeno de interferência quântica intermediário, sendo as relações (13) e (14) chamadas de *relações de dualidade*.

As visibilidades em cada anteparo são dadas pelas equações (10) e (11). Pode-se mostrar que as distinguibilidades em cada um dos anteparos são dadas por

$$\mathcal{D}_1 = \left| \frac{R_2 T_1 - R_1 T_2}{R_2 T_1 + R_1 T_2} \right|, \quad (15)$$

para o anteparo 1 e

⁴⁵ Este é o caso considerado no presente trabalho: todos os fótons são, por hipótese, preparados no estado $i\sqrt{R_1}|s_y\rangle + \sqrt{T_1}|s_x\rangle$ pelo primeiro divisor de feixe. Para maiores detalhes, ver a referência Jaeger *et al.* (1995).

⁴⁶ Como já citado, Bohr se referia apenas às situações extremas nas quais há total conhecimento sobre o caminho e não há interferência ($\mathcal{D}_i = 1$ e $\mathcal{V}_i = 0$) e quando não se sabe nada sobre o caminho e há interferência com máximo contraste ($\mathcal{D}_i = 0$ e $\mathcal{V}_i = 1$). Essas duas situações são complementares.

$$\mathcal{D}_2 = \frac{|R_1 R_2 - T_1 T_2|}{|R_1 R_2 + T_1 T_2|}. \quad (16)$$

para o anteparo 2. Assim como as visibilidades, as distinguibilidades variam entre zero e a unidade. Essas expressões são válidas no caso em que não há detectores não-demolição, polaroides ou quaisquer outros dispositivos que possam marcar o caminho do fóton. Para esses casos as distinguibilidades apresentam formas matemáticas mais complexas. Portanto, o simples desbalanceamento dos divisores de feixe pode fornecer informação sobre caminho, reduzindo a visibilidade do padrão de interferência.

Suponha que escolhamos uma marca produzida por um fóton em um dado anteparo. Escolhida essa marca, é proposto um palpite sobre o caminho (A ou B) associado ao fóton que originou essa marca. Pode-se mostrar que a probabilidade de que esse palpite seja correto é dada por

$$P_{si} = \frac{1 + \mathcal{D}_i}{2}. \quad (17)$$

Essa probabilidade e sua relação com a distinguibilidade pode ser mais facilmente entendida se for melhor detalhado o efeito do desbalanceamento dos divisores de feixe na possibilidade de ter conhecimento sobre o caminho associado ao fóton no interferômetro. Tomando o anteparo 1, a equação (12) mostra que o número aproximado de fótons emitidos pela fonte que vão atingir esse anteparo é $N_1 \approx (R_1 T_2 + R_2 T_1) N_F$. É simples perceber que $R_1 T_2$ é a probabilidade de um fóton ser refletido pelo primeiro divisor de feixe e transmitido pelo segundo, podendo ser associado ao caminho B. Analogamente, $R_2 T_1$ é a probabilidade do fóton ser transmitido pelo primeiro divisor de feixe e refletido pelo segundo, podendo ser associado ao caminho A. Portanto, $N_{1A} \approx R_2 T_1 N_F$ é o número de fótons que atinge o anteparo 1 sendo associados ao caminho A, enquanto que $N_{1B} \approx R_1 T_2 N_F$ é o número de fótons que atinge o mesmo anteparo, mas associados ao caminho B. Dessa forma, a probabilidade de um fóton atingir o anteparo 1 e ser associado ao caminho A é $p_{1A} = N_{1A} / N_1 = R_2 T_1 / (R_1 T_2 + R_2 T_1)$. Analogamente, a probabilidade de atingir o mesmo anteparo mas estar associado ao caminho B é $p_{1B} = N_{1B} / N_1 = R_1 T_2 / (R_1 T_2 + R_2 T_1)$. Em resumo, sendo possível conhecer os coeficientes de reflexão dos dois divisores de feixe, é também possível conhecer as probabilidades p_{1A} e p_{1B} . No caso de divisores de feixe desbalanceados, pode-se ter

$p_{1A} \neq p_{1B}$ e a estratégia para maximizar a probabilidade de dar um palpite correto sobre o caminho que está associado ao fóton que produziu determinada marca no anteparo 1 é, obviamente, escolher para aquela marca o caminho com a maior das duas probabilidades⁴⁷, ou seja,

$$P_{s1} = \text{Max}\{p_{1A}, p_{1B}\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}|p_{1A} - p_{1B}|. \quad (18)$$

Pode-se constatar que a distinguibilidade no anteparo 1 é dada por $\mathcal{D}_1 = |p_{1A} - p_{1B}|$. Substituindo-a em (18), obtém-se a equação (17) (referente ao anteparo 1).

No caso em que os divisores de feixe são balanceados as distinguibilidades são nulas e a probabilidade de emitir um palpite correto a respeito do caminho associado a um fóton que produziu uma dada marca no anteparo é 1/2. Ou seja, não há nenhuma informação disponível que permita emitir um palpite correto sobre o caminho associado ao fóton que produziu a marca em questão e o palpite se reduz a uma simples adivinhação.

Quando um desbalanceamento nos divisores de feixe é inserido e $p_{1A} \neq p_{1B}$, a probabilidade maximizada de emitir um palpite correto sobre uma dada marca no anteparo passa a ser maior do que 1/2, ou seja, passa a existir distinguibilidade de caminho (o que diminui a visibilidade do padrão de interferência). Pode-se fazer exatamente o mesmo raciocínio para o anteparo 2.

Portanto, pode haver uma coexistência entre comportamento ondulatório (produção de padrão de interferência discernível) e corpuscular (possibilidade de atribuir caminho ao fóton) no interferômetro. Para ilustrar o quão forte pode ser essa coexistência, considere o anteparo 1 em uma situação na qual $R_1 = 0,5$ e $R_2 = 0,9$. Isso acarreta $\mathcal{V}_1 = 0,6$ e, portanto, $\mathcal{D}_1 = \sqrt{1 - \mathcal{V}_1^2} = 0,8$. A probabilidade de emitir um palpite correto sobre o fóton que produziu uma marca qualquer nesse anteparo é dada pela relação (18). Como temos $p_{1A} / p_{1B} = R_2 T_1 / (R_1 T_2) = 9$, o palpite que maximiza a probabilidade de ser correto é um palpite no caminho A e

⁴⁷ Essa estratégia de maximizar a probabilidade de dar um palpite bem sucedido sobre qual evento ocorrerá entre dois possíveis (mas não a princípio equiprováveis) pode ser compreendida em uma situação mais usual: um jogo *cara ou coroa*. Suponha que seja usada uma moeda 'viciada' e é sabido que a probabilidade de resultar em cara é maior do que resultar em coroa. Obviamente, para maximizar a probabilidade de emitir um palpite correto sobre qual dos dois eventos ocorrerá, escolhe-se o evento com maior probabilidade de ocorrência (cara, no caso).

$P_{1s} = \text{Max}\{p_{1A}, p_{1B}\} = (1 + \mathcal{D}_1) / 2 = 0,9$. Portanto, é possível emitir um palpite correto a respeito do caminho associado a 90 por cento dos fótons que atingem o anteparo 1 e ainda assim obter, nesse mesmo anteparo, um padrão de interferência bastante discernível (apesar de menos nítido do que o padrão de máximo contraste, como mostra a figura 5).

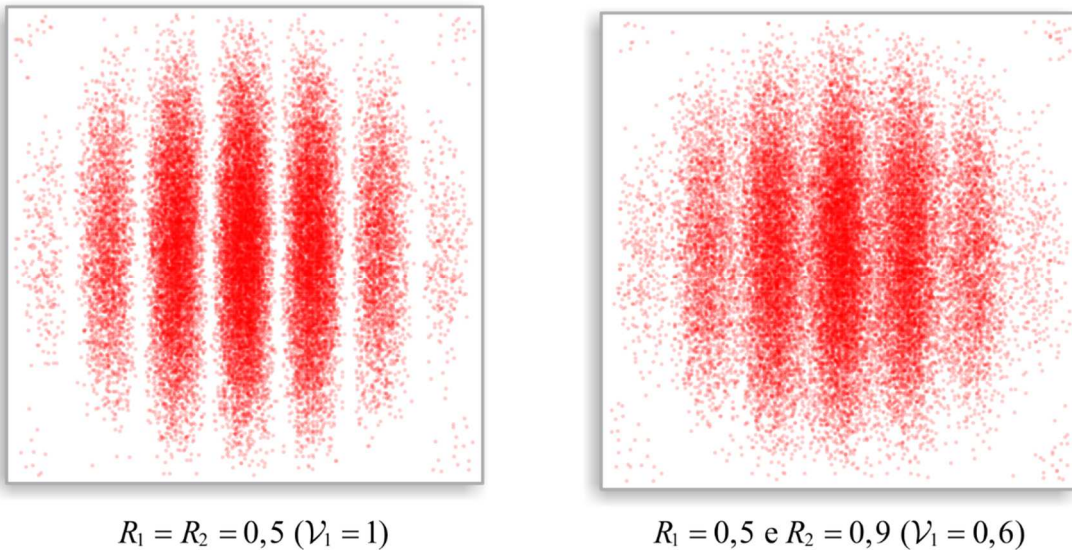


Figura 5: Padrões de interferência no anteparo 1. À esquerda é mostrado o caso em que ambos os divisores de feixe são balanceados, gerando um padrão de interferência com visibilidade 1. À direita, o segundo divisor de feixe é desbalanceado ($R_2 = 0,9$), gerando um padrão de interferência cuja visibilidade é 0,6.

3.4 Emaranhamento Quântico no IVMZ

Para a simulação do emaranhamento quântico, foi escolhida uma experiência cujo aparato experimental é simples (ver figura 6). A fonte emite fótons, polarizados a 45 graus, e o dispositivo⁴⁸ com formato de ‘Y’ converte cada um destes fótons em um par⁴⁹ de fótons emaranhados em estados polarização, conservando o *momentum* linear, direcionando um fóton para cada braço do interferômetro (inserindo separação espacial) com emaranhamento máximo (KWIAT *et al.*, 1999, p. R775). Como consequência da conservação do *momentum*, os fótons do par emaranhado têm uma leve diferença de frequência entre si. Uma característica importante do fenômeno do emaranhamento é que não faz mais sentido falar em fótons individuais, devendo-se considerar o par de

⁴⁸ Este dispositivo contém um cristal PDC tipo-I (*Parametric Down Converter*), direcionador e compensador de fase e foi criado por Paul G. Kwiat e seu grupo (KWIAT *et al.*, 1999).

⁴⁹ Isto é possível com a inserção de dois cristais não-lineares superpostos no interferômetro, resultando em um processo conhecido como conversão paramétrica descendente de tipo I (EDAMATSU, 2007, p. 7179).

fótons como um objeto quântico único, interagindo com o par de polaroides. Após os polaroides há dois detectores, D_A e D_B , que detectam e absorvem os fótons, de modo que não há interação com os demais dispositivos. Os índices A e B, assim como já descrito anteriormente, fazem referência aos braços do interferômetro e, neste caso, há um fóton do par associado a cada braço.

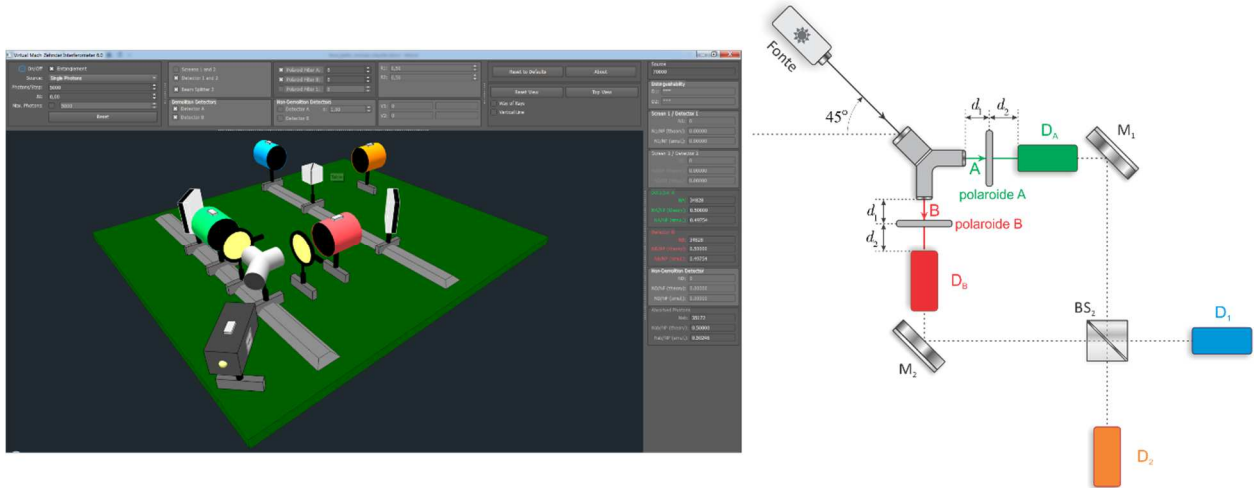


Figura 6: Captura de tela do IVMZ preparado para simular o emaranhamento quântico (lado esquerdo da figura) com um par de fótons emaranhados em polarização e um desenho esquemático dessa configuração (à direita). Há um polaroide em cada braço do interferômetro, após os quais são posicionados detectores.

A compreensão do fenômeno requer que se interprete as contagens de fótons nos detectores A e B mas, para isso, é preciso antes reconhecer as características do par produzido. O estado que descreve o par de fótons produzido depois da interação com o cristal não linear é

$$|\psi\rangle_{12} = \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) (|h\rangle_1 \otimes |h\rangle_2 + |v\rangle_1 \otimes |v\rangle_2) \right] \otimes \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) (|s_x\rangle_1 \otimes |s_y\rangle_2 + |s_y\rangle_1 \otimes |s_x\rangle_2) \right], \quad (19)$$

onde $|h\rangle$ e $|v\rangle$ representam, respectivamente, os estados de polarização do fóton, para os quais estabelecemos uma correspondência⁵⁰ com a oscilação do campo elétrico nas

⁵⁰ Classicamente, a polarização da luz descreve o comportamento do campo elétrico. Por exemplo, uma onda plano-polarizada (ou linearmente polarizada) na direção x indica que é nessa direção que o vetor campo elétrico oscila. Filtros polaroides ideais transmitem *totalmente* a componente da luz polarizada na direção paralela ao seu eixo de transmissão, absorvendo *totalmente* a componente perpendicular a esse eixo (ou paralela ao eixo de absorção, como mostrado na figura 7). Para as considerações subsequentes, considere que os polaroides são ideais. Ao invés de se trabalhar com a descrição clássica da polarização, por meio do vetor campo elétrico, define-se o *estado de polarização* de cada fóton individual. Sabe-se que a luz pode transferir *momentum* angular aos objetos macroscópicos nos quais ela incide. Em 1936, Richard A. Beth demonstrou, experimentalmente, que luz circularmente polarizada exerce torque sobre os objetos, ou seja, transfere *momentum* angular (BETH, 1936). Sabe-se ainda que o fóton pode possuir spin e *momentum* angular orbital (LEACH *et al.*, 2002), sendo o spin associado à polarização e o *momentum* angular orbital à distribuição espacial de intensidade (ALLEN *et al.*, 1992; GORIY *et al.*, 1998).

direções horizontal e vertical, respectivamente (que definem a polarização linear de uma onda eletromagnética). O símbolo de produto externo \otimes deve obrigatoriamente ser usado, pois os espaços de Hilbert dos vetores de estado translacionais e de polarização são distintos, sendo também distintos os espaços de Hilbert dos vetores de estado de cada fóton.

O par é produzido de forma que os fótons, rotulados pelos índices 1 e 2, tenham a mesma polarização, podendo esta ser horizontal ou vertical – cada um desses estados do par tem probabilidade 1/2. O estado emaranhado em polarização pela conversão paramétrica descendente do tipo I pode criar estados em configurações do tipo $(1/\sqrt{2})(|h\rangle_1 \otimes |h\rangle_2 + e^{i\theta}|v\rangle_1 \otimes |v\rangle_2)$, podendo a fase θ ser facilmente controlada no experimento (EDAMATSU, 2007; KWIAT *et al.*, 1999). Para a simulação no *software*, foi escolhido o estado emaranhado em polarização mostrado na equação (19). O estado translacional do par é tal que um fóton do par é direcionado para o caminho A (associado ao estado translacional $|s_x\rangle$) e o outro para o B (associado ao estado translacional $|s_y\rangle$), como mostra o segundo termo entre colchetes na equação (19) – por exemplo, o primeiro termo $|s_x\rangle_1 \otimes |s_y\rangle_2$ indica o fóton 1 associado ao caminho A e o fóton 2 ao B. Note que o vetor de estado translacional é simétrico pelo fato de fótons serem bósons. Assim, o vetor de estado global também é simétrico.

Pode-se mostrar que a probabilidade de detecção do par emaranhado, que é igual à probabilidade do par ser transmitido pelos polaroides, é dada por $(1/2)\cos^2(\xi_A - \xi_B)$ (EDAMATSU, 2007, p. 7183), onde ξ_A e ξ_B são as orientações dos eixos de transmissão dos polaroides A e B, respectivamente (ver figura 7). A probabilidade de detecção é a mesma para ambos os detectores, pois independente da orientação em que se encontrarem os polaroides, sempre que um detector acusar a detecção de um fóton, o outro detector também acusará. O mesmo ocorre para os casos de não-deteção.

Suponhamos que a luz incida em um objeto, se propague na direção z , seja circularmente polarizada e que cada fóton absorvido transfira um quantum de *momentum* angular. Pode-se mostrar que o *momentum* angular individual do fóton é bem definido ao longo da direção z , assumindo os valores $J_z = \pm\hbar$. Os valores $-\hbar$ e $+\hbar$ correspondem, respectivamente, à luz polarizada circularmente à direita e à esquerda. Se a luz for linearmente polarizada mostra-se que não há transferência de *momentum* angular. Uma abordagem semiclássica dessa situação está bem desenvolvida em Nussenzveig (2003, p. 311-315).

i-ésimo polaroide

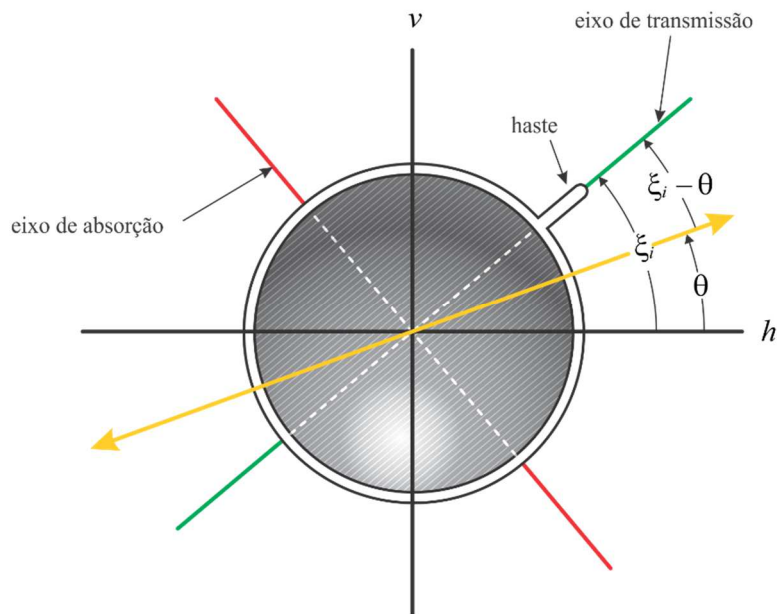


Figura 7: Representação esquemática de um polaroide i do interferômetro. Na configuração em que ele simula o emaranhamento há dois polaroides ($i = A, B$), um em cada braço e mais um na porta de saída 1, para simular o *apagador quântico*. O eixo de transmissão está orientado segundo um ângulo ξ_i com a direção horizontal. Se o estado de polarização do fóton corresponder ao análogo clássico de uma onda cujo campo elétrico oscila em uma direção θ em relação à horizontal, haverá uma probabilidade $\cos^2(\xi_i - \theta)$ desse fóton ser (completamente) transmitido pelo polaroide e, conseqüentemente, $\sin^2(\xi_i - \theta)$ de ser absorvido pelo mesmo polaroide.

Note que isso é bastante contraintuitivo: ou ambos os fótons são transmitidos ou ambos são absorvidos, não ocorrendo nunca algum evento em que um é transmitido e outro não. Os fótons emaranhados possuem ambos a mesma polarização – horizontal ou vertical. Orientando-se os polaroides, por exemplo, com $\xi_A = 45^\circ$ e $\xi_B = 135^\circ$, o par sempre será absorvido, não havendo transmissão, mesmo que individualmente seus estados de polarização não sejam correspondentes a uma oscilação do campo elétrico na direção perpendicular ao eixo de transmissão de nenhum dos polaroides. Tal fato obviamente não ocorreria se os fótons não estivessem emaranhados. Outra situação bastante contraintuitiva é quando um dos polaroides está orientado na direção vertical e o outro na horizontal. Caso não estivessem emaranhados, um dos fótons sempre seria

acusado em algum detector. Estando emaranhados segundo o estado descrito por (19), jamais nenhum dos detectores acusará um fóton.

A simulação do emaranhamento quântico via IVMZ em sala de aula é discutida no capítulo 6, na análise de interações discursivas. Na terceira etapa dessa pesquisa foi realizada a simulação da complementaridade e do emaranhamento quântico, enquanto que na segunda etapa a simulação se restringiu à complementaridade, uma vez que o *software* ainda estava passando pela atualização que implementou o emaranhamento.

4 REVISÃO DA LITERATURA

A literatura na área de ensino aponta fortes evidências de que as simulações computacionais auxiliam nos processos educacionais (BELL *et al.*, 2010; CHANG *et al.*, 2008; FINKELSTEIN *et al.*, 2005; GAZIT, YAIR e CHEN, 2005; RUTTEN, VAN JOOLINGEN e VAN DER VEEN, 2012). Além de possibilitar aprendizagens em níveis mais elevados quando comparadas com situações onde estas não são utilizadas, o papel das simulações assume uma importância ainda maior em cenários onde a observação direta em laboratório envolve sistemas mais complexos ou na forma de um recurso que pode ser usado juntamente com os experimentos concretos (DE JONG, LINN e ZACHARIA, 2013; OLYMPIOU e ZACHARIA, 2012). Por outro lado, Dillenbourg (2008) argumenta que as tecnologias educacionais perderam um pouco do prestígio que inicialmente desfrutavam e isso pode ser atribuído, entre outras causas, aos exageros envolvidos tanto em relação às possibilidades que se imaginava que pudessem ter (por exemplo, substituição do papel do laboratório experimental) quanto ao fato de se superestimar os efeitos sobre a aprendizagem.

O IVMZ é uma ferramenta mediadora que, nessa pesquisa, visa contribuir no processo de apropriação de uma classe de conceitos da FQ. Embora não se tenha apresentado nesse texto uma extensiva revisão da literatura sobre o uso e as limitações das simulações computacionais no ensino, estes aspectos foram levados em consideração tanto na concepção do *software* quanto nas atividades em sala de aula. Nosso posicionamento é de que as simulações computacionais não podem ser encaradas como um substitutivo dos experimentos concretos em laboratório ou como representações fieis da natureza, mas como um diferencial que permite explorar aspectos que não seriam possíveis ou que, pelo menos, seriam mais difíceis de serem estudados no laboratório.

O IVMZ é uma simulação computacional com elevado grau de interatividade, uma vez que permite realizar a alteração de diversos parâmetros (coeficiente de reflexão e transmissão nos divisores de feixe, orientação dos eixos de transmissão nos filtros polaroides, alteração na eficiência dos detectores não demolição, número de fótons emitidos a cada segundo, intervalo de tempo entre duas emissões consecutivas e número máximo de fótons emitidos pela fonte) e utilização de dispositivos variados (filtros polaroides, detectores demolição e não demolição nos braços do interferômetro, além de anteparos ou detectores nas portas de saída). Os cenários obtidos a partir da simulação

com o IVMZ contam com diversos recursos (contagens de fótons nas portas de saída, indicação do número de fótons emitidos pela fonte, contagens de fótons absorvidos nos filtros polaroides, detectores demolição e não demolição indicando o valor teórico previsto e valor obtido na simulação, representação das figuras formadas nos anteparos a partir da detecção dos fótons, além da indicação dos valores de visibilidade e distinguibilidade associados a cada uma das portas de saída). Dessa forma, durante a atividade de simulação, quaisquer alterações realizadas pelo usuário podem ter suas implicações imediatamente testadas, possibilitando tanto análises qualitativas quanto quantitativas. Dessa forma, estão envolvidos tanto modelos conceituais (princípios e conceitos relacionados ao sistema em estudo) quanto operacionais (operações cognitivas e não cognitivas) (DE JONG e VAN JOOLINGEN, 1998).

Apesar de todos os cenários possíveis de serem exploradas com a simulação no IVMZ, é imprescindível levar-se em consideração que tal recurso computacional não consiste em um espelho do real. Todas as representações (visuais e numéricas) obtidas através da simulação computacional com o IVMZ partem de um modelo teórico, que por sua vez é uma tentativa de descrição/aproximação da realidade. A constituição de tal modelo leva em consideração leis e princípios pertencentes ao arcabouço teórico subjacente, no caso, a teoria quântica. Além disso, há que se considerar a complexidade envolvida na montagem de um sistema como esse no contexto de laboratório, um aspecto que não pode ser colocado em segundo plano, sob o risco de se promover distorções não apenas em termos da interpretação física daquilo que se está simulando, mas também em relação ao uso acrítico das simulações computacionais como ferramenta para o ensino, o que é um grande equívoco.

Subjacente à atividade de simulação realizada com o IVMZ há uma série de simplificações que precisam ser consideradas, por exemplo: a) os divisores de feixe são considerados simétricos; b) todo fóton emitido pela fonte será detectado em uma das portas de saída; c) a fonte é ideal, de modo que quaisquer alterações na visibilidade dos padrões de interferência devido ao processo de emissão de fótons é desprezado; d) os espelhos nos braços do interferômetro estão levemente desalinhados, de modo que os caminhos ópticos dos componentes de luz que chegam em diferentes pontos da tela são diferentes, resultando na formação das franjas de interferência; e) a propagação da luz é considerada como se fosse uma onda esférica, de modo que o desalinhamento entre os espelhos corresponde à interferência de duas fontes (real e virtual) que são dispostas

perpendicularmente ao eixo de incidência sobre o primeiro divisor de feixes, resultando na formação de um padrão semelhante àquele formado no experimento da dupla fenda.

4.1 Objetivo e metodologia

Considerando que a formação docente em FQ, especialmente no que se refere a conceitos centrais de sua primeira e segunda revoluções, delimitou o contexto de realização desta pesquisa, realizou-se uma revisão da literatura a fim de identificar se estão sendo conduzidos estudos nesta temática e o que os mesmos propõem. Esta revisão envolve as publicações em periódicos cujo estrato Qualis/Capes é A1, A2 e B1, nas áreas de Ensino, Educação e Astronomia/Física, no período que se estende de janeiro/2000 a abril/2015 (1º critério classificatório). Os periódicos com classificação na área Astronomia/Física, embora não tenham como objetivo principal a pesquisa em Ensino de Física, foram englobados nessa revisão em função da possibilidade de alguns trabalhos terem implicações diretas ou indiretas na temática investigada.

A revisão foi realizada em duas etapas: a primeira no ano de 2013 (até o mês de julho) e a segunda etapa durante o primeiro semestre de 2015 (até o mês de abril). Posteriormente à etapa inicial de revisão, a classificação Qualis/Capes foi atualizada, alterando o estrato de alguns⁵¹ periódicos, os quais passaram a integrar apenas a segunda etapa de revisão, ou seja, foram analisados apenas os trabalhos publicados nesses periódicos a partir de agosto/2013. Isso implica que alguns trabalhos voltados ao ensino de FQ em nível de graduação não foram considerados na revisão (e. g. CURILEF, ZANDER e PLASTINO, 2006; DIMITROVA e WEIS, 2010; KOHNLE *et al.*, 2010; MATTEUCCI, FERRARI e MIGLIORI, 2010; ÖZCAN, 2010; PANTOJA, MOREIRA e HERSCOVITZ, 2011).

Em relação ao período de 2000 a 2007, já existe um trabalho de revisão realizado por Pereira e Ostermann (2009), que tem como foco as produções voltadas ao ensino da FMC como um todo e que também faz parte da nossa revisão da literatura. Esse estudo é bastante abrangente e mesmo que tenha sido levado em consideração na nossa pesquisa, a revisão que fizemos incluiu outros periódicos, de modo que foi

⁵¹ Os periódicos *European Journal of Physics*, *Latin-American Journal of Physics Education* e *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* passaram a ser considerados na segunda etapa da revisão da literatura.

necessário reexaminar o período já considerado por esses autores. Esses trabalhos se aproximam pelo fato de ambos abordarem o ensino de FMC, entretanto, nosso objeto de interesse são os estudos que abordam o ensino de FQ em nível de graduação. Nossa revisão permitiu identificar 77 artigos, distribuídos em 17 periódicos cuja área de avaliação atual, segundo o Qualis/Capes, é Ensino ou Educação, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Periódicos com a respectiva área de avaliação, estrato e o quantitativo de artigos selecionados em cada um

Periódico	Área de avaliação	Estrato	Quantidade de artigos
<i>American Journal of Physics</i>	Ensino	A1	28
Caderno Brasileiro de Ensino de Física	Ensino	B1	4
Ciência & Educação	Ensino	A1	6
Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências	Ensino	A2	1
<i>Enseñanza de las Ciencias</i>	Ensino	A1	1
<i>European Journal of Physics</i>	Ensino	A1	2
<i>International Journal of Science Education</i>	Ensino	A1	1
Investigações em Ensino de Ciências	Ensino	A2	4
<i>Journal of Research in Science Teaching</i>	Educação	A1	1
<i>Physics Education</i>	Ensino	A1	4
Revista Brasileira de Ensino de Física	Ensino	A1	6
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	Ensino	A2	2
<i>Revista de Enseñanza de la Física</i>	Ensino	B1	2
<i>Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias</i>	Ensino	A2	3
<i>Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias</i>	Ensino	A2	2
<i>Science & Education</i>	Ensino	A1	9
<i>Science Education</i>	Educação	A1	1

A sistemática adotada na revisão consistiu no acesso aos periódicos a partir do portal da CAPES, na busca e seleção dos artigos a partir de palavras-chave (em português, espanhol e inglês), inicialmente no título e no resumo como: formação de professores, ensino de FQ, dualidade onda-partícula, quântica, interpretações,

postulados, Mach-Zehnder, complementaridade, Copenhagen, não-localidade, EPR, emaranhamento e entrelaçamento (2º critério classificatório). Após a leitura dos resumos dos artigos que atendiam os critérios já citados muitos foram eliminados por não estarem relacionados aos propósitos do presente trabalho de revisão. Os trabalhos, nessa situação, apresentavam discussões de cunho filosófico-epistemológico, tratavam de resenhas de livros, ou promoviam a compreensão de contextos históricos ou fundamentos de física (3º critério classificatório) e foram desconsiderados (e. g. FREIRE JR., 2013a; GREGORIO, 2014; GRIFFITHS, 2011). Reconhecemos a importância que essas discussões têm para a nossa formação tanto em ensino quanto em pesquisa, inclusive utilizando alguns desses trabalhos para embasamento da presente investigação, entretanto, nesta seção, o foco está mais direcionado para as ações em sala de aula ou estudos já conduzidos com este fim. Além disso, alguns trabalhos que atendiam os 3 critérios anteriores também foram descartados porque realmente não tinham pretensões voltadas ao ensino (4º critério classificatório).

Após a leitura integral de cada um desses trabalhos, procedeu-se à organização de categorias, semelhantes às aquelas já utilizadas por Pereira e Ostermann (2009).

4.2 Organização das categorias de análise

Os trabalhos foram organizados em cinco categorias: trabalhos de revisão, propostas didáticas, propostas de arranjos experimentais para introdução da FQ, artigos de pesquisa e levantamento de concepções em FQ.

Em relação à diferenciação entre artigos de pesquisa e levantamento de concepções em FQ há uma ressalva que precisa ser feita. Artigos que discutem concepções em FQ envolvem a realização de pesquisa e a discussão dos seus resultados, portanto, poderiam compor uma categoria única. Optamos por uma categoria à parte para os estudos que envolvem concepções em FQ porque se tratam de pesquisas com um objetivo específico, que as diferenciam de outros trabalhos. A categoria artigos de pesquisa, por sua vez, traz trabalhos relacionados à discussão de aspectos ligados ao ensino e aprendizagem, questões epistemológicas ou resultados da execução de propostas didáticas que foram implementadas em salas de aula. Julgamos importante fazer essa diferenciação apenas em função das pretensões em cada tipo de pesquisa.

A partir dessas categorias, são 3 trabalhos de revisão da literatura, 28 propostas didáticas, 27 artigos de pesquisa, 11 propostas de arranjos experimentais para ensino de FQ e 8 trabalhos sobre concepções em FQ. Desse total de 77 trabalhos, 30 estão relacionados à formação docente em FQ.

4.2.1 Trabalhos de revisão

Nesta categoria há três importantes trabalhos que oferecem uma visão bastante detalhada acerca das pesquisas em ensino de FMC. Estes foram levados em consideração no nosso estudo, tanto no que se refere à proposição de categorias quanto em relação a uma visão mais completa sobre os estudos voltados ao ensino da FMC.

Greca e Moreira (2001) apresentaram os resultados de uma vasta revisão da literatura voltada à questão do ensino de FQ em nível introdutório. A partir da consulta, desde o ano de 1970, aos principais periódicos nacionais e internacionais da área de Ensino de Ciências, foram encontradas mais de cinquenta publicações que tratavam da temática em estudo, tanto em disciplinas introdutórias de nível médio e universitário quanto em cursos de formação de professores. Estas, foram agrupadas nas seguintes categorias: concepções dos estudantes, críticas à abordagem tradicional e propostas de inovações didáticas. De acordo com os autores, a literatura carece de estudos voltados às concepções dos estudantes acerca dos conceitos quânticos. Por outro lado, a pesquisa revelou que diversas propostas didáticas foram desenvolvidas com ênfase nos aspectos conceituais da FQ, mesmo que os resultados produzidos pelas mesmas tenham sido incipientes.

Inspirados nesse trabalho inicial, Pereira e Ostermann (2009), se dedicaram a investigar o ensino da FMC como um todo. Foram analisados 102 artigos (Qualis/Capes A1, A2 ou B1) publicados entre 2001 e 2006, os quais foram organizados nas seguintes categorias: propostas didáticas testadas em sala de aula, levantamento de concepções, bibliografia de consulta para professores e análise curricular. Do universo de artigos selecionados, os autores organizaram duas subcategorias, sendo: bibliografia de consulta para professores (52 trabalhos) e resultados de pesquisa (50 trabalhos). Dentre o universo pesquisado, apenas 7 publicações eram voltadas à formação de professores, revelando a carência de estudos sobre esta temática.

O trabalho de revisão de Silva e Almeida (2011) consiste na análise de 23 artigos científicos sobre ensino de FQ no Ensino Médio publicados nos principais periódicos

nacionais e internacionais (de livre acesso) voltados ao ensino das Ciências, desde o primeiro número de cada um até agosto/2010. Os artigos foram organizados em 5 categorias: revisão da literatura sobre o ensino de FQ/FMC (3 artigos); análise curricular (2 artigos); análise dos conteúdos em livros que abordam FQ/FMC (1 artigo); elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino (16 artigos); concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no Ensino Médio (1 artigo). A análise realizada pelos autores traz argumentos que reforçam a necessidade da realização de pesquisas em sala de aula e o que já escrevemos em seções anteriores no que diz respeito à necessidade de se investir na formação inicial do professor para que o ensino da FQ supere o *status* de pertinência e torne-se realidade.

Comparando-se os resultados da nossa revisão com o que foi apresentado por Pereira e Ostermann (2009), uma vez que ambas as revisões guardam algumas semelhanças entre si, observa-se um expressivo aumento em relação às produções voltadas à questão da formação docente em FQ, pois enquanto consideramos somente trabalhos nesta temática, esses autores analisaram todo o universo da FMC. Além disso, pode-se dizer que não há superposição em relação aos resultados das duas revisões, uma vez que dos 7 trabalhos apontados por Pereira e Ostermann (2009) como estando relacionados à formação docente, apenas 3 constam na nossa revisão (KALKANIS, HADZIDAKI e STAVROU, 2003; OSTERMANN e RICCI, 2004; 2005), estando os 4 restantes direcionados a outros contextos e temas da FMC.

4.2.2 Propostas didáticas

A categoria 'propostas didáticas' está dividida em duas subcategorias: propostas didáticas implementadas e propostas didáticas não-implementadas. A avaliação das propostas didáticas descritas nessa segunda subcategoria não envolve a aplicação das mesmas na forma de cursos ou curtas sequências de aulas, mas apenas avaliações isoladas que não necessariamente estão vinculadas a uma intervenção didática contínua e, desse modo, foram consideradas como 'não-implementadas'.

Propostas didáticas implementadas em sala de aula

Greca, Moreira e Herscovitz (2001) apresentaram a fundamentação teórica desenvolvida para uma abordagem da FQ, visando melhorar a compreensão de seus conceitos por parte de estudantes das ciências exatas e das engenharias. A

argumentação que embasou a proposta foi de que as disciplinas introdutórias de FQ estão fortemente atreladas ao formalismo matemático sem a preocupação de conectá-lo à fenomenologia, além de destinarem muito tempo aos aspectos históricos da teoria e, assim, enfatizarem demasiadamente as características clássicas dos sistemas em detrimento das quânticas. Centrado nos conceitos de superposição de estados, dualidade onda-partícula, princípio da indeterminação e o problema da medição, foi conduzido um estudo piloto com duração de 24 horas-aula em uma turma de Engenharia da UFRGS, com 25 estudantes. A partir da realização de pré e pós-teste e comparação com os resultados obtidos em uma turma piloto, na qual foi realizada uma abordagem tradicional, os autores concluíram que a abordagem fenomenológico-conceitual realizada obteve sucesso em relação a integração de conceitos fundamentais para a compreensão de fenômenos microscópicos. A partir do reconhecimento da eficácia da proposta implementada, os autores sugeriram a utilização da mesma em cursos de licenciatura.

Também com foco voltado a curso de Engenharia, Bao e Redish (2002) tomaram o conceito de probabilidade como central para o desenvolvimento de tutoriais enquanto recurso didático. O objetivo era que esses tutoriais auxiliassem os alunos na construção de um modelo que lhes permitisse reconhecer os sistemas físicos, no âmbito da FMC, a partir do caráter probabilístico. As situações apresentadas nos tutoriais envolviam sistemas unidimensionais e exploravam basicamente o conceito de densidade de probabilidade, formulação matemática da densidade de probabilidade com sistemas clássicos e normalização. Esses recursos foram testados em duas disciplinas onde, em cada uma delas, havia um grupo experimental e um grupo de controle e a avaliação foi conduzida a partir de testes de múltipla escolha com todos os alunos e entrevista com 16 deles. Nos grupos experimentais, metade dos estudantes conseguiu desenvolver a noção de probabilidade quântica e a outra metade utilizava esse conceito de forma errada (por exemplo, associando a probabilidade de encontrar um elétron em um poço de potencial à velocidade do objeto quântico). Nos grupos de controle, em torno de 80 por cento dos estudantes não conseguiu explicar nem mesmo sistemas clássicos.

Müller e Wiesner (2002)⁵², por sua vez, apresentaram os resultados obtidos com o desenvolvimento de um curso de FQ, em nível introdutório. A partir da base empírica

⁵² Nessa implementação original do IMZ como ferramenta de ensino, seus idealizadores já indicavam a possibilidade de incluir conceitos como não-localidade, paradoxo EPR e as desigualdades de Bell.

(o conhecimento das concepções dos estudantes) constituída em pesquisas anteriores, desenvolveram um *software* para simular o fenômeno da interferência quântica no IMZ. A base conceitual do curso centrou-se em aspectos como a interpretação probabilística de Born, o caráter não-passivo da medição e a impossibilidade de se atribuir, simultaneamente, propriedades dinâmicas como posição, momento e energia a objetos quânticos. A avaliação do curso, realizada pelos estudantes, evidenciou que estes desenvolveram concepções que podem ser consideradas apropriadas à FQ.

Defendendo o ensino de uma física mais atual, Zollman, Rebello e Hogg (2002) propuseram uma física do século XXI para os estudantes do século XXI e, para isso, desenvolveram materiais didáticos para ensinar FQ a estudantes de diversos níveis e em diversas etapas do ensino a partir da mesma abordagem educacional, neste caso, o que denominam 'aprender-fazendo'. Estes materiais (instrução interativa e atividades que podem ser executas pelos próprios estudantes, como as simulações computacionais) foram, inicialmente, pensados para o nível correspondente ao que seria o Ensino Médio⁵³ brasileiro e, aos poucos, ampliados para os cursos de nível superior. Utilizando uma estratégia instrucional baseada em ciclos de aprendizagem, os estudantes inicialmente se deparavam com alguma situação que deveriam explicar. Em seguida estudavam a teoria e, por fim, aplicavam os novos conceitos aprendidos para resolver o problema que havia sido proposto. Com base no grande número de testes de campo realizados e avaliação tanto das atitudes quanto das aprendizagens dos estudantes, os autores concluíram que o projeto foi bem sucedido. Destacaram como aspectos positivos o fato de o mesmo ter possibilitado a aprendizagem de alguns conceitos abstratos e ter fornecido informações acerca da dificuldade dos professores em auxiliar os estudantes na aprendizagem destes conceitos por meio das visualizações no computador e nas atividades que eles próprios desenvolveram.

Preocupadas com as dificuldades dos estudantes em desenvolver a percepção diferenciada dos fenômenos microscópicos exigida pela FQ, Greca e Herscovitz (2002) desenvolveram uma unidade didática com a finalidade de introduzir esta teoria de um ponto de vista fenomenológico-conceitual. Com base na teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird, as autoras propõem que o núcleo destes modelos criados pelos

⁵³ Nesse caso, o material instrucional tem o nome de *Visual Quantum Mechanics*.

estudantes supere os modelos clássicos⁵⁴ e passe a incluir uma nova classe de fenômenos e conceitos, como a superposição linear de estados e o princípio da indeterminação. A implementação da unidade didática contou com a realização de pré e pós-teste, os quais consistiram de um teste de associação de conceitos e resolução de problemas e foram aplicados a 69 estudantes. Segundo as autoras os resultados dessa pesquisa desenvolvida com estudantes de engenharia foram satisfatórios, uma vez que possibilitaram uma razoável compreensão dos temas estudados e, além disso, propõem que a unidade didática pode também ser utilizada para formação de professores de Física.

Em outro estudo, realizado com 3 turmas de estudantes de Engenharia (total de 94 estudantes) em uma disciplina de Física Geral, Greca e Herscovitz (2005), introduziram conteúdos de FQ partindo das propriedades quânticas de sistemas microscópicos e interpretando resultados de experimentos constantes na literatura. Tendo como conceito central o princípio de superposição de estados, o curso foi desenvolvido em 24 horas-aula e, novamente, foi organizado com base na teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird.

Os resultados apresentados são fundamentados na análise de testes de associação de conceitos e resposta a questões teóricas, tanto por parte dos estudantes que participaram do curso quanto por parte de estudantes que foram instruídos por meio de uma abordagem tradicional da FQ, que cursaram disciplinas de introdução à FQ e estudantes de pós-graduação em Física. Segundo as autoras, os resultados obtidos revelaram que, apesar de algumas concepções alternativas persistirem, os estudantes que participaram da abordagem diferenciada da FQ revelaram um grau aceitável de compreensão acerca da teoria quântica em comparação com os demais.

Também com base na teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird, Greca e Freire Jr. (2003) desenvolveram uma estratégia didática focada na abordagem fenomenológico-conceitual da FQ na qual, ao invés de procurarem analogias clássicas, centraram-se na interpretação ortodoxa do conceito de estado quântico. Conceitos como princípio da superposição, princípio da indeterminação, distribuição de probabilidade e o problema da medição foram desenvolvidos a partir de uma estratégia de ensino em

⁵⁴ Ao se referirem aos modelos clássicos, as autoras estão, neste estudo, destacando: a definição clássica da estrutura do átomo; a extensão da noção clássica de indeterminação à FQ tomando-a como uma impossibilidade intrínseca a um fenômeno; o reconhecimento da probabilidade como um mero recurso estatístico, sem relação ao princípio da indeterminação.

espiral, composta por experimentos, tutoriais com questões conceituais e problemas, além de aulas teóricas.

Esta estratégia didática, desenvolvida com grupos de estudantes de Engenharia, permitiu aos pesquisadores concluir que tanto as analogias clássicas quanto a abordagem da evolução histórica não contribuem para a aprendizagem de conceitos de FQ. Por outro lado, a estratégia didática mostrou que a maioria dos estudantes conseguiu compreender os princípios básicos da teoria. Por outro lado, os autores desse trabalho não deixam claro a quais analogias clássicas estão se referindo, se é alguma em específico ou a quaisquer dessas analogias e argumentam que as mesmas têm o inconveniente de adiar o contato dos alunos com fenômenos da FQ, além de reforçar a tendência dos estudantes a criarem estas analogias para os fenômenos quânticos. É interessante fazer aqui um contraponto, uma vez que concordamos parcialmente com estas afirmações. As analogias poderão ou não contribuir nesse processo, uma vez têm suas limitações e podem induzir o estudante a estabelecer generalizações quando isso não é desejável. A utilização de analogias no ensino de ciências já é um assunto bastante explorado na literatura, uma vez que o ensino-aprendizagem de conceitos na área, principalmente na Física, muitas vezes, requer um considerável exercício de abstração (BOZELLI e NARDI, 2008; SILVA e ALMEIDA, 2008). Uma situação em que consideramos fundamental recorrer às analogias é no estudo da interferência quântica, onde a óptica ondulatória (uma teoria clássica) precisa ser introduzida no sentido de auxiliar na compreensão desse fenômeno, eixo central da dualidade onda-partícula (OSTERMANN *et al.*, 2009; OSTERMANN e PRADO, 2005; OSTERMANN e RICCI, 2004; 2005; PEREIRA, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2009a; 2009b; 2009c; PESSOA JR., 1997; 2005; 2006).

Desta forma, utilizar-se de linguagem e conceitos mais familiares aos estudantes é, nesse caso, um recurso didático que os auxilia a compreender o novo, seja pelas similaridades entre diferentes domínios ou pela capacidade de resgatar alguns pré-requisitos para se atingir o conceito alvo. Assim, apesar das indicações na literatura acerca das limitações das analogias, com as quais concordamos, ao se abordar o fenômeno da interferência da óptica clássica não se tem como objetivo fazer com que o estudante imagine entidades não-imagináveis; pelo contrário, busca-se a familiarização com o fenômeno, não necessariamente com as 'entidades' envolvidas.

Pospiech (2003) desenvolveu uma estratégia de ensino baseada na leitura de diálogos e reflexão acerca dos aspectos filosóficos da FQ. Trazendo para a sala de aula as visões da filosofia antiga (Aristóteles), do Iluminismo (visão mecanicista de Newton) e da filosofia da FQ (Heisenberg e Schrödinger), foram realizados vários cursos complementares sobre a teoria quântica. Esses cursos eram voltados para estudantes e para a formação continuada de professores buscando-se interpretar a natureza a partir das diferentes formas de ver o mundo, proporcionadas pela FQ. Além de explorar a não-localidade e o experimento EPR, do ponto de vista do processo de medição em FQ, a estratégia de ensino explorou o viés filosófico por trás destes conceitos. Segundo o autor, este trabalho, com a narração e análise dos diálogos, também foi capaz de prover aos professores novos conhecimentos para que possam enriquecer seus cursos.

Através de uma abordagem qualitativa e com o objetivo de promover um processo de reconstrução conceitual pela justaposição de dois modelos competitivos (modelo atômico semiclássico e o modelo de átomo aceito pelas teorias físicas modernas), Kalkanis, Hadzidaki e Stavrou (2003) desenvolveram e testaram, na Grécia, uma estratégia didática com professores de Física em formação. Como forma de superação de equívocos de natureza epistemológica, os pesquisadores proporcionaram uma abordagem conceitual que assumiu a Física Clássica e a FQ como dois sistemas físicos distintos. Ao investigar os conhecimentos prévios destes professores, constataram que os principais equívocos apresentados estavam relacionados à instrução recebida durante a formação anterior à universidade.

As estratégias adotadas durante a realização do estudo foram as seguintes: ao invés de evitar as referências à Física Clássica, mostraram que esta representa uma visão de mundo totalmente diferente dos padrões de pensamentos subjacente aos fenômenos microscópicos; ao invés de evitar o modelo de Bohr, utilizaram o mesmo como um modelo semiclássico em desacordo com o modelo de átomo aceito pela ciência moderna, revelando as profundas diferenças conceituais entre Física Clássica e FQ; ao invés de evitar descrições dualistas, revelaram o significado do princípio da complementaridade. Esta estratégia foi desenvolvida com um grupo de 98 alunos (28 eram estudantes de FQ) e, comparando com um grupo de controle formado por 102 alunos (30 eram estudantes de FQ), os pesquisadores concluíram que o grupo experimental apresentou melhores resultados no que se refere ao processo de construção e acomodação de conceitos.

O trabalho de Kalkanis, Hadzidaki e Stavrou (2003) parte do princípio da complementaridade para explorar a dualidade onda-partícula, ou seja, aborda um dos conceitos centrais da FQ a partir de conceitos da óptica ondulatória. Esse trabalho, voltado à formação de professores é mais um exemplo em que as analogias são utilizadas como um poderoso recurso para ensinar conceitos de FQ. Ao invés de evitar as referências à Física Clássica, estas serviram como ponto de apoio para a elaboração de novos modelos e interpretações; as suas potencialidades acabaram revelando-se na construção de uma ponte para se chegar aos modelos fisicamente aceitos pela ciência.

Interessados em investigar acerca da formação de professores em FQ, Ostermann e Ricci (2004) apresentaram os resultados da implementação de uma unidade didática sobre esta teoria. Essa implementação ocorreu em um curso de Mestrado Profissional em Ensino de Física na UFRGS, na disciplina de Tópicos de Física Moderna e Contemporânea, com 18 alunos. Visando superar a abordagem tradicional da FQ tanto em nível de graduação quanto de pós-graduação, foi dado um tratamento conceitual aos temas estudados com a realização de pré-teste, simulação computacional no IMZ e pós-teste. O pré e o pós-teste foram constituídos por questões objetivas e questões organizadas segundo a escala *Likert*.

Segundo os autores, houve expressiva melhora por parte dos alunos na compreensão de aspectos conceituais da FQ considerados básicos. Esta unidade conceitual foi reestruturada e implementada novamente na mesma disciplina (OSTERMANN e RICCI, 2005), estando centrada, do ponto de vista conceitual, na dualidade onda-partícula, fazendo uso de recursos didáticos como a simulação computacional da dupla fenda com elétrons e da interferência com fótons no IMZ. Os autores concluíram que a abordagem conceitual realizada e o uso das simulações computacionais promoveram mudanças significativas nas concepções dos alunos, a mais importante delas no que se refere à diferenciação entre objetos clássicos e quânticos.

Também a partir do desenvolvimento de uma unidade didática, Yoder (2006) explorou duas das maiores dificuldades que os estudantes encontram nos cursos introdutórios de FQ: o caráter abstrato e contraintuitivo desta teoria quando comparada com a Mecânica Clássica e o seu caráter probabilístico. Analisando três sistemas físicos (partícula em uma caixa, quique de uma bola e oscilador harmônico simples), o autor

propõe a superação destas dificuldades explorando a densidade de probabilidade e calculando-a para cada um dos sistemas clássicos estudados.

Mais uma vez tem-se um exemplo de utilização da Física Clássica como ponto de partida para exploração de conceitos da FQ. Da mesma forma como a FQ não é uma extensão da Física Clássica, mas uma nova visão de mundo acerca dos fenômenos, a transição da analogia empregada até a situação física em questão não é algo que ocorre naturalmente, pois requer a sistematização de novos conceitos e organização de novas categorias para exploração do fenômeno. A transição do mundo macro para o micro não requer apenas a redução a pequenas escalas, mas a introdução de uma nova física, menos visual e mais abstrata, de modo que a analogia utilizada não deve ser inviabilizada, mas reconhecida como algo limitado.

Goff (2006) apresentou uma metáfora para ilustrar a natureza contraintuitiva da superposição quântica através de um 'jogo da velha' quântico, o qual permite a abordagem deste fenômeno de forma qualitativa, construindo uma base conceitual para a compreensão da teoria. O jogo permite explorar conceitos fundamentais da FQ, como estados, superposição, colapso, não-localidade, emaranhamento, princípio de correspondência, interferência e decoerência. Segundo o pesquisador, o 'jogo da velha' quântico desempenha um importante papel ao desafiar a imaginação dos alunos e também por evidenciar aspectos da ciência como a integração entre aquilo que é especulação e os rigores da teoria.

No trabalho desenvolvido por Barros e Bastos (2007) o fenômeno físico explorado foi a difração de elétrons, a partir do Ciclo da Experiência de Kelly, com cinco alunos de Física Moderna e dez de FQ em um curso de Licenciatura em Física. A primeira etapa do ciclo (antecipação) contou com um pré-teste, formado por cinco questões que buscavam verificar a existência de erros conceituais nas respostas dos alunos. Nas demais etapas (investimento, encontro com o evento, confirmação ou refutação e revisão construtiva), participaram apenas os estudantes de FQ. A sequência da investigação ocorreu com a utilização de um texto sobre formação de ondas, princípio de Huygens, modelo corpuscular de Einstein para a luz e interpretações da difração de elétrons segundo a FQ, além da aplicação de um novo questionário. Na terceira etapa do ciclo foram analisadas as respostas do pré-teste e ministradas duas aulas sobre fenômenos ondulatórios e corpusculares, dualidade onda-partícula e a difração de elétrons. As aulas foram conduzidas tanto de forma expositiva quanto a partir da realização de atividades

experimentais e utilização de *applets* e, ao final de cada uma, foi aplicado um questionário (questionário de confirmação ou refutação). A revisão construtiva foi conduzida a partir de um pós-teste e de novas questões, as quais foram respondidas durante a realização de entrevistas. A comparação entre os resultados do pré-teste, dos questionários e entrevistas revelou que a compreensão dos alunos se desenvolveu a partir da utilização de conceitos da óptica ondulatória clássica, o que concorda com Ostermann e Ricci (2004), e posterior diferenciação entre objetos clássicos e quânticos, de modo que avançaram até o princípio da complementaridade.

Dando continuidade às pesquisas realizadas pelo grupo, Ostermann, Prado e Ricci (2008) analisaram o processo de evolução conceitual de 14 professores do Ensino Médio em relação a tópicos introdutórios de FQ desenvolvidos a partir de uma perspectiva sociocultural. Esta investigação foi conduzida no âmbito do Mestrado Profissional em Ensino de Física da UFRGS, durante uma disciplina de FQ. A análise das repostas dos alunos a questionários desenvolvidos para este estudo, centrado na simulação computacional da interferência quântica no IVMZ, buscou avaliar em que medida o uso deste *software* atuou como facilitador da aprendizagem, considerando-se os conhecimentos prévios da óptica ondulatória.

As conclusões desse estudo podem ser agrupadas em torno de dois aspectos: a) apesar do uso correto dos termos dualidade onda-partícula e superposição de ondas os alunos demonstraram não compreender o experimento da dupla fenda em regime clássico e, sem o domínio destes conhecimentos de óptica ondulatória, comprometeram seu aprendizado em FQ; b) a simulação com o IVMZ poderia induzir os estudantes a adotarem a interpretação de Copenhagen (pode-se ter a impressão de que o aparato experimental é que determina o comportamento do fóton), indicando a necessidade de novos estudos acerca da ferramenta computacional utilizada.

Em um estudo baseado no uso de recursos computacionais, McKagan *et al.* (2008) apresentaram uma visão geral das simulações *PhET* acerca de temas de quântica bem como descrições de pesquisas apontando a eficácia de tais simulações. As primeiras simulações de FQ testadas com alunos de Engenharia em palestras para grandes públicos acerca da Física Moderna foram: efeito fotoelétrico, tunelamento, experiência da dupla fenda e a difração de Davisson-Germer. Por meio de uma pesquisa qualitativa os pesquisadores chegaram à conclusão de que os estudantes que usaram a simulação demonstraram ter estruturado modelos muito consistentes para os

fenômenos, o que pode ser atribuído ao potencial das simulações como recursos didáticos eficazes na compreensão de conceitos bastante abstratos e contraintuitivos da FQ.

A partir de um estudo inicial⁵⁵ sobre a compreensão em FQ por parte de alunos em início de curso de graduação, Singh (2008a) desenvolveu e avaliou tutoriais interativos para estudo desta teoria física. Esses tutoriais exploraram a evolução temporal da função de onda, o princípio da indeterminação e o IMZ⁵⁶ e a avaliação dos mesmos foi conduzida através da realização de pré e pós-teste (para cada tema explorado) bem como entrevistas com estudantes. Esses testes, realizados na Universidade de Pittsburgh, exigiam que os estudantes, ao trabalharem com os tutoriais, justificassem os procedimentos realizados. As análises dos pré e pós-testes exibiram escores que aumentaram de 40 - 50 por cento para cerca de 85 por cento. O autor da pesquisa considerou a possibilidade de esses tutoriais serem utilizados como uma importante ferramenta de aprendizagem *online*, tanto para estudantes de graduação como no início da pós-graduação, além de poderem ser utilizados nas aulas de FQ na graduação.

O trabalho de Asikainen e Hirvonen (2009) relata o desenvolvimento de um curso de FQ para professores de Física (em formação e em serviço), sua implementação e avaliação. O curso contou com 36 h de aulas teóricas e 18 h para realização de exercícios e estava organizado nos seguintes tópicos: capacidade calorífica molar de gases, radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, espalhamento Compton, dualismo onda-partícula, espectros e modelos atômicos, equação de Schrödinger e interpretação de Born, efeito Zeeman e o spin do elétron. A estratégia metodológica utilizada envolveu o que os autores chamaram de 'processo cíclico de ensino-aprendizagem', uma sequência com seis etapas, que se inicia com a resolução de 'pré-exercícios' e alterna aulas teóricas com atividades de resolução de problemas. As aulas envolveram a discussão de modelos teóricos, abordagem da História e Filosofia da Física e a atuação do professor enquanto mediador, tendo como pano de fundo a interação social numa perspectiva vygotskyana. Participaram 8 professores em formação, na primeira intervenção e, 17 professores em serviço, na segunda intervenção. Foi realizado a

⁵⁵ Ver Singh (2008b) na subseção 4.2.4.

⁵⁶ O IMZ utilizado nesse estudo é uma adaptação da versão alemã, desenvolvida na Universidade de Munique Ludwig-Maximilians e que inspirou o desenvolvimento do IVMZ pelo grupo de pesquisa na UFRGS.

comparação entre pré e pós-teste e um estudo de caso envolvendo entrevistas, antes e ao final do curso, com três participantes: um professor de Física em formação, um professor de Ensino Médio e um professor de Ensino Fundamental (*grade 7-9*). Os resultados mostraram uma melhora significativa nas respostas dos professores ao final do curso, dado o aprofundamento presente nas suas explicações. A partir disso os autores sugerem que a comparação entre a hipótese clássica, os resultados empíricos e a explicação quântica pode facilitar a compreensão do efeito fotoelétrico e que a metodologia adotada permite que os professores consigam monitorar sua própria aprendizagem.

Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009b) fizeram uma apresentação detalhada do IVMZ e apresentaram os resultados obtidos em uma intervenção em sala de aula, que fez uso dessa simulação computacional como recurso didático, realizada com 11 alunos de graduação em Física da UFRGS em estudos anteriores. Com o objetivo de melhorar a compreensão acerca do comportamento dos fótons e elétrons, foi desenvolvido um roteiro para guiar a exploração do *software* e, como instrumento de análise das interações discursivas, os pesquisadores apoiaram-se em referenciais metodológicos fundamentados na perspectiva sociocultural. Como conclusão desse estudo, os pesquisadores argumentaram a favor das simulações com o IVMZ, uma vez que o mesmo possibilita uma contextualização de conceitos e princípios da FQ melhorando, assim, a compreensão dos mesmos.

Como forma de melhorar a compreensão de conceitos de FQ por parte dos estudantes, Zhu e Singh (2011) propuseram uma abordagem centrada no experimento de Stern-Gerlach. Tal consideração por parte dos pesquisadores reside no fato de a abordagem experimental realizada permitir tanto a preparação de um estado quântico específico a partir de um estado arbitrário, quanto a exploração de questões relacionadas com a evolução temporal da função de onda e medição quântica. Além disso, destacaram a importância deste experimento para ensinar os alunos a interpretar os possíveis resultados do experimento e as vantagens de escolher uma base adequada para fazer previsões sobre estes resultados. Nesse estudo, 35 estudantes foram separados em dois grupos, sendo que um recebeu tratamento tradicional e o outro trabalhou com um tutorial desenvolvido para o experimento. A partir da análise de pré e pós-teste e também de entrevistas com os alunos de graduação e pós-graduação

envolvidos no estudo os autores concluíram que esse tutorial interativo foi útil no sentido de prover uma melhora na compreensão dos conceitos.

Gordon e Gordon (2010) desenvolveram uma versão do conhecido jogo 'campo minado' para ensinar conceitos de FQ como, superposição, emaranhamento e não-localidade. Através de três tipos de medição (medição clássica que leva ao colapso, medição sem detonar a bomba e medições não-locais) o jogador precisa descobrir a localização de todas as bombas sem fazê-las explodir. Mesmo sem ter testado efetivamente o campo minado quântico⁵⁷, os pesquisadores defendem a potencialidade do mesmo para a compreensão das propriedades contraintuitivas da FQ.

Pantoja, Moreira e Herscovitz (2014) apresentam os resultados da implementação de uma unidade didática em uma disciplina do curso de Licenciatura em Física da UFRGS, que contava com cinco estudantes matriculados. Essa unidade, com 12 horas de duração e desenvolvida à luz da teoria da Aprendizagem Significativa, de Ausubel, e dos Campos Conceituais, de Vergnaud, buscava explorar os conceitos de sistema físico, variáveis dinâmicas, estado de um sistema físico e evolução temporal. As situações escolhidas para atribuir sentido aos conceitos estudados foram o experimento de Stern-Gerlach, o átomo de hidrogênio e a molécula de amônio. A intervenção didática contou com um texto de apoio e teve início com a apresentação das situações, seguida pelos conceitos e, posteriormente, o desenvolvimento do conteúdo a partir da diferenciação progressiva e reconciliação integradora. A partir da análise de um pré-teste e das tarefas realizadas pelos estudantes, as principais conclusões dos autores foram: a) houve mudança considerável de variáveis da estrutura cognitiva; b) quatro estudantes adotaram processos mais próximos do polo de aprendizagem significativa do que do polo de aprendizagem mecânica; c) as situações-problema devem esclarecer o conceito de probabilidade, visto que o significado atribuído pelos estudantes para esta característica da teoria quântica se mostraram inadequados, mesmo após a instrução, consistindo em um obstáculo epistemológico importante.

O trabalho de Malgieri, Onorato e De Ambrosis (2014) consiste em uma proposta para ensino de FQ a partir das integrais de caminho de Feynman (FEYNMAN e HIBBS, 1965) e que se distancia de abordagens mais tradicionais que seguem uma sequência histórica. A sequência didática busca promover a discussão de temas da FQ numa

⁵⁷ O jogo está disponível para o sistema operacional *Android* no site *Google Play*.

perspectiva conceitual e epistemológica a partir de diversos experimentos como, por exemplo, interferência com fótons individuais, interferência com elétrons e com nêutrons, indivisibilidade dos fótons, difração da molécula de fulereno, entre outros. Ao longo desta sequência, são realizadas as simulações via *GeoGebra*, as quais envolvem os experimentos previamente discutidos. A avaliação da sequência didática foi realizada em um curso de formação de professores em nível de pós-graduação, com 12 estudantes-professores que participaram de 4 encontros, cada um com 2 horas de duração, com a realização de pré e pós-teste e exercícios extraclasse. A partir da análise da compreensão geral dos aspectos computacionais, interpretação da interferência com fótons individuais, papel da medição e princípio da indeterminação, os autores propõem que a sequência didática possibilitou ganhos consideráveis de aprendizagem. Além disso sinalizam para a possibilidade de que a mesma possa ser expandida tanto com a introdução de novas simulações e exercícios quanto em relação ao tratamento dos fenômenos, uma vez que pretendem explorar a notação e Dirac e o formalismo matricial para sistemas de estados discretos.

Propostas didáticas não-implementadas em sala de aula

Jacobs e Wiseman (2005) apresentaram uma história intitulada 'O caso dos ladrões de duas cores' como uma proposta que pode ser utilizada para explicar o conceito de não-localidade para graduandos e não-especialistas. A trama discute as experiências de pensamento de Nathaniel David Mermin sobre o paradoxo EPR e é apresentada no estilo dos mistérios de Sherlock Holmes, nos fazendo lembrar a alegoria científica de Robert Gilmore. A história envolve o roubo ao Museu de Arte Semiclássica, durante a exposição 'Realismo Local', por três ladrões que são vistos por quatro guardas a partir das cores de suas roupas (e é esse o motivo da confusão entre os vigilantes, o que acaba dificultando as investigações). Preocupações do Dr. Doyle com a separação dos presos por parte da polícia para que não haja comunicação entre eles e com o interrogatório (cada um dos presos não sabe qual pergunta foi feita para o outro) introduzem suavemente aspectos importantes do emaranhamento quântico. Personagens como o advogado de defesa Dr. Doyle (provavelmente uma homenagem a Arthur Doyle, criador de Sherlock Holmes) e a jovem Alice Bell (que trabalha em um local chamado 'Espaço de Hilbert' e faz consultoria para a empresa jurídica Greenberger-Horne-Zeilinger) conseguem envolver o leitor discutindo o caso do roubo a partir da não-localidade em uma história que vale a pena ser lida.

Com o objetivo de apoiar o ensino da dualidade onda-partícula em nível de graduação, Betz, Lima e Mussatto (2009) desenvolveram um objeto de aprendizagem baseado no IMZ. O material apresentado consiste em uma animação comentada e interativa e é acompanhado de textos que abordam tanto o formalismo matemático quanto o caráter histórico e epistemológico da teoria estudada. A animação é explorada em três diferentes níveis: o comportamento de um feixe luminoso do ponto de vista da óptica geométrica; em seguida tem-se uma abordagem a partir de aspectos ondulatórios e, finalmente, é explorada a visão corpuscular com a noção de pacotes de ondas associados aos fótons. A partir da avaliação do material produzido, realizada por meio de questionários com alunos de Licenciatura em Física da UFRGS, os autores consideraram que o material produzido facilitou a compreensão de conceitos da FQ por permitir a visualização de fenômenos corpusculares e ondulatórios. Como forma de implementar novas potencialidades na animação, destacaram a possibilidade de explorar diferentes interpretações da FQ.

Dando continuidade ao trabalho com animações⁵⁸ para ensino de FQ, Kohnle *et al.* (2012) desenvolveram, na Universidade de *Saint Andrews* (Escócia), um conjunto de *applets*, distribuídos gratuitamente no *site* do grupo de pesquisa, para serem usados no ensino desta teoria física em qualquer nível do currículo de graduação. Com base nos resultados das pesquisas e na experiência docente, os autores estão engajados em um projeto para o desenvolvimento de tais ferramentas visando melhorar a compreensão conceitual por parte dos estudantes e, assim, tornar mais úteis os cursos de FQ. Estes *applets* passaram por uma fase de testes, mostrando a necessidade de se ampliar a funcionalidade do *site* e otimização das animações. A partir de uma pesquisa de diagnóstico, os pesquisadores constataram ganhos substanciais na aprendizagem dos alunos que exploraram as animações.

Kohnle *et al.* (2014) apresentam também uma proposta para introdução da FQ em nível universitário que visa romper com o padrão comumente adotado, que parte do estudo de sistemas contínuos. Para isso, propõem o estudo de sistemas de dois níveis apresentando aos estudantes, desde o início do curso, situações sem qualquer explicação clássica (por exemplo, a experiência de interferência com fótons únicos no IMZ, emaranhamento de pares de partículas de spin $1/2$ e discussão de teorias de

⁵⁸ Ver Kohnle *et al.* (2010).

variáveis ocultas). O material *online*⁵⁹ que integra esta proposta é composto por 17 atividades de simulação contendo uma questão inicial e explicadas passo a passo e 80 artigos que abordam diferentes conceitos ou sistemas quânticos e estão organizados, conforme o aspecto da FQ que abordam, em: Física, Matemática, História, informacional e fundacional.

Castrillón, Freire Jr. e Rodríguez (2014) fazem uma exposição comentada de alguns experimentos e conceitos fundamentais da FQ, organizada na forma de uma unidade didática, com seis etapas, destinada a professores em formação. Esta sequência didática foi organizada com base nas Unidades de Ensino Potencialmente Significativas (UEPS)⁶⁰ entretanto, os autores a propõem como sendo uma aproximação de tais unidades. Enquanto ambas compartilham o mesmo objetivo, que é organizar os conteúdos a fim de facilitar a aprendizagem, as UEPS possuem um aprofundamento teórico em termos da aprendizagem que está ausente nessa sequência didática de FQ. Os sistemas de dois níveis são discutidos a partir do princípio da superposição e do emaranhamento quântico, que conduzem ao problema da medição, seguidos de contextualização no IMZ e também de experimentos tradicionais como dupla fenda e Stern-Gerlach. O teletransporte e a criptografia quântica são discutidos como importantes aplicações tecnológicas propiciadas pelo conhecimento produzido em FQ. Esta sequência didática procura discutir temas mais atuais da FQ, como o emaranhamento, e surge como um importante guia para ser utilizado com professores em formação podendo ajudar a suprir algumas lacunas, entretanto, a mesma carece de implementação.

As 28 propostas didáticas (36 por cento do total de trabalhos analisados) se distribuem de maneira uniforme ao longo do intervalo considerado (janeiro/2000 a abril/2015), uma vez que cerca de 50 por cento delas foi desenvolvida na primeira metade desse período. O mesmo percentual ocorre se analisarmos somente as 11 propostas didáticas que efetivamente envolvem professores em formação.

Do total de propostas didáticas, 13 se basearam no emprego de recursos computacionais o que revela uma tendência de utilização destes como forma de promover a interação dos estudantes com aspectos contraintuitivos da teoria e melhorar

⁵⁹ O material produzido pode ser acessado no endereço <<http://quantumphysics.iop.org/>>.

⁶⁰ Para maiores detalhes sobre as Unidades de Ensino Potencialmente Significativas recomenda-se consultar Moreira (2011).

a aprendizagem dos seus conceitos principais. Como podemos observar, a partir do trabalho de Müller e Wiesner (2002) tem-se destacado a simulação do IMZ como um importante recurso didático.

4.2.3 Propostas de arranjos experimentais para introdução da Física Quântica

Formalizamos esta categoria a fim de trazer para a discussão várias proposições que não se encaixam nem como estudos teóricos nem como propostas testadas, mas como estudos de laboratório ou acerca de fundamentos da teoria quântica que podem ter reflexos no seu ensino ou até mesmo serem implantados futuramente em sala de aula.

Schneider e La Puma (2002) desenvolveram, com luz visível, uma experiência de medição de caminho que é análoga às realizadas com um IMZ. Os idealizadores deste experimento defendem que a possibilidade de medição de caminho escolhido pelo fóton ou a observação de franjas de interferência produzidas a partir de fótons únicos e situações-limite para o caso clássico possibilitam seu uso junto a alunos de graduação. Mesmo que o experimento não tenha sido testado com este público, permite o estudo de fenômenos quânticos a partir de uma abordagem fenomenológica.

Da mesma forma, Holbrow, Galvez e Parks (2002) relataram o desenvolvimento de experimentos para o ensino, os quais tratam do comportamento quântico dos fótons em divisores de feixe, já apontando para a modificação da forma habitual com que a FQ é estudada. A experiência descrita no artigo e avaliada em sala de aula contou com apoio pedagógico de materiais especialmente desenvolvidos para o estudo do comportamento dos fótons nos divisores de feixe. Este estudo foi o ponto de partida para o desenvolvimento de outros experimentos voltados ao estudo da FQ em nível de graduação.

Neste sentido, dando continuidade ao trabalho, Galvez *et al.* (2005) apresentaram cinco experimentos de FQ desenvolvidos para cursos de graduação. Estes experimentos (interferência com um fóton, interferência com dois fótons, polarização, interferência e a existência do fóton) visando ao estudo de fundamentos de FQ foram realizados com fótons correlacionados e possibilitaram o estudo do emaranhamento e indistinguibilidade utilizando um IMZ e um interferômetro de Michelson. Apesar do alto custo envolvido no aparato experimental, devido ao uso de uma fonte *laser* capaz de produzir fótons correlacionados, os autores destacaram que os experimentos são atraentes e

apresentam resultados possíveis de serem analisados e interpretados por estudantes de graduação. Frente aos custos apresentados, entre catorze e trinta e cinco mil dólares, pode-se considerar que uma alternativa interessante aos mesmos é recorrer às simulações computacionais.

Dehlinger e Mitchell (2002a) descreveram a montagem de um aparato experimental cujo custo total estimado na época foi de quinze mil dólares e que permite a produção e detecção de pares de fótons emaranhados. Entre outros dispositivos, são utilizados um diodo *laser*, um cristal não-linear, filtros polarizadores e detectores. Segundo os autores, a simplicidade das técnicas empregadas e o baixo custo da montagem experimental permitem que o mesmo possa ser utilizado em laboratórios de ensino de graduação, o que possibilitaria explorar, por exemplo, o paradoxo EPR e as desigualdades de Bell. Ainda no mesmo volume do *American Journal of Physics*, Dehlinger e Mitchell (2002b) descreveram a realização do experimento que propuseram, usando a polarização de pares de fótons emaranhados para demonstrar a não-localidade na FQ.

Em outro experimento, Thorn *et al.* (2004) observaram o comportamento quântico da luz, evidenciando a existência do fóton e argumentaram de modo favorável à realização do mesmo em nível de graduação. Devido à dificuldade de realização de experimentos que comprovam a existência do fóton, defenderam seu aparato experimental como uma inovação para os laboratórios neste nível de ensino. Este experimento consistiu em fazer incidir luz *laser* ultravioleta sobre um cristal não-linear o qual, através da conversão paramétrica descendente, produz dois fótons correlacionados. Um dos fótons produzidos no cristal é direcionado para um divisor de feixe polarizador podendo, a seguir, ser direcionado por reflexão ou transmissão para as saídas de detecção. A ausência de contagens simultâneas nos detectores é atribuída à indivisibilidade dos fótons e, segundo os autores, a capacidade de obter uma estatística confiável para as contagens em tempos relativamente curtos faz com que o experimento seja adequado para cursos de graduação.

Além da diversidade de conceitos que podem ser explorados nos experimentos, os autores destacam que, com o acréscimo de poucos equipamentos a esta estrutura, podem-se realizar muitos outros experimentos, o que justificaria os quarenta mil dólares investidos. Este elevado valor, considerando a realidade das universidades brasileiras, acaba impossibilitando, pelo menos em boa parte destas instituições, a realização de

tais experimentos em laboratório, reforçando ainda mais os argumentos a favor das simulações computacionais já discutidas.

Dimitrova e Weis (2008) ao defenderem que a dualidade onda-partícula tem um papel fundamental em cursos introdutórios de FQ, propõem que a abordagem, em separado, dos aspectos corpuscular e ondulatório é prejudicial para uma boa compreensão sobre a natureza da luz. Com o objetivo de facilitar o estudo deste conceito e permitir uma compreensão mais clara da natureza complementar dos comportamentos ondulatório e corpuscular, apresentaram um experimento baseado em um IMZ com uma fonte *laser* de baixa intensidade, que permite que estes dois aspectos sejam explorados no mesmo aparato experimental.

Como alternativa ao alto custo da câmera CCD (*Charge-Coupled Device*, em inglês, é um sensor para captar imagens com maior nitidez) utilizada em outros experimentos, o aparato que desenvolveram substituiu este dispositivo por um osciloscópio. A montagem experimental realizada pelos autores foi desenvolvida de modo que a realização dos experimentos permitiria o uso em sala de aula por meio de projeções multimídia. Também indicaram a possibilidade de realizar outros experimentos como o apagador quântico e a inserção de polaroides para obter informações sobre o caminho dos fótons.

Pearson e Jackson (2010) apresentam alguns experimentos de FQ, em estágio inicial de desenvolvimento, que foram testados com estudantes de ensino secundário em nível avançado. Os experimentos consistiam basicamente em duas montagens: a) utilização de uma fonte *laser* de Hélio-Neônio incidindo sobre um divisor de feixe para verificação da distribuição clássica das contagens após este dispositivo e para demonstrar a indivisibilidade do fóton; b) emissão de fótons únicos em um IMZ, com [e sem] polarizadores para observar o desaparecimento [formação] dos padrões de interferência. Essa segunda montagem experimental restringe-se ao estudo das situações extremas, onde se tem informação nula sobre 'caminho' [visibilidade total] ou total conhecimento sobre 'caminho' [visibilidade nula], desconsiderando situações intermediárias, conforme já citamos na seção 3.3. Segundo os autores, estes experimentos podem ser realizados em nível de graduação e auxiliar os alunos a compreenderem aspectos contraintuitivos da teoria. Além disso, argumentam que a realização de cálculos durante os experimentos pode estabelecer uma conexão entre

ambos, facilitando a compreensão da teoria e, assim, superando dificuldades que aparecem até mesmo em cursos mais avançados.

Galvez (2010), desenvolveu um estudo que não se trata de um trabalho experimental, mas do desenvolvimento de um formalismo matricial (derivado do formalismo de Dirac) baseado no conceito de *qubit*. Este formalismo foi proposto com vistas a explicar experimentos de laboratório com fótons correlacionados em cursos de FQ em nível de graduação. Segundo o próprio autor, seu objetivo foi estudar de forma mais detalhada os experimentos desenvolvidos pelo seu grupo em trabalhos anteriores e já abordados nesta revisão, os quais são: projeções de polarização tipo Stern-Gerlach, interferência no IMZ, apagador quântico, interferência com dois fótons, emaranhamento e desigualdades de Bell.

O emaranhamento e o apagador quântico são objeto de estudo em uma montagem experimental proposta por Ferrari e Braunecker (2010). Trata-se de uma proposta de estudo de sistemas de dois níveis a partir da realização de experimentos de 'identificação de caminho' com fótons em um IMZ. O formalismo matemático também é explorado, uma vez que a notação de Dirac é usada para representar as operações unitárias nos divisores de feixe e projeções nos espelhos, bem como as probabilidades de detecção e o efeito global sobre um fóton.

O fenômeno do emaranhamento quântico também é explorado experimentalmente no trabalho de Dederick e Beck (2014). O aparato experimental utilizado é constituído por uma fonte *laser*, uma lâmina de meio comprimento de onda (introduz uma defasagem de meio comprimento de onda), uma lâmina birrefringente e um cristal de beta-bário borato (na verdade, são dois cristais superpostos e orientados perpendicularmente entre si), polarizadores, lentes e detectores. Através da conversão paramétrica descendente de tipo I, a partir do feixe *laser* incidente, o cristal produz, aleatoriamente, pares de fótons, onde ambos sempre estão com o mesmo estado de polarização (polarização vertical ou polarização horizontal). A amplitude relativa e a fase desses estados são variados a partir de ajustes na lâmina de meio comprimento de onda e na lâmina birrefringente. Em cada um dos caminhos delimitados pelo cristal há polarizadores que promovem uma separação angular dos dois estados, de modo que os fótons com estado de polarização vertical são transmitidos sem nenhum desvio e aqueles com estado de polarização horizontal são desviados para um lado. Em cada uma das 'portas de saída' há detectores de fótons. A partir desta montagem experimental os

autores obtiveram resultados condizentes tanto com a descrição de estados mistos quanto de estados emaranhados, propondo que isso pode ser uma forma de inserir a discussão do emaranhamento em nível de graduação.

Os trabalhos sob a classificação de 'propostas de arranjos experimentais para introdução da FQ' trazem importantes contribuições no sentido de inspirar a concepção de recursos didáticos como o IVMZ, que podem agregar aspectos fundamentais dessas propostas e ser uma importante ferramenta para o ensino de FQ na formação docente e no próprio Ensino Médio. Além disso, como já dito, é uma alternativa mais viável e barata.

4.2.4 Artigos de pesquisa

Nesta categoria, discutimos tanto os trabalhos de pesquisa que não necessariamente foram realizados no contexto da sala de aula quanto aqueles que são derivados de estudos desenvolvidos em sala de aula e que dedicaram-se a estudar aspectos teóricos do processo de ensino-aprendizagem.

Pospiech (2000) apresentou um trabalho teórico sobre a abordagem de princípios da FQ, como os princípios da indeterminação e da complementaridade, a partir do estudo do experimento EPR aplicado a sistemas de dois estados, como o spin. Apesar de o estudo não ter sido aplicado em salas de aula, ao defender uma abordagem mais conceitual da FQ, o centro de interesse desloca-se do formalismo matemático para as interpretações filosóficas da teoria, rompendo com estratégias de ensino baseadas no duelo clássico *versus* não-clássico. Assim, o ensino da FQ valoriza a construção histórica das teorias do ponto de vista das interpretações, possibilitando que os alunos pensem sobre a teoria e não apenas memorizem conceitos abstratos. Os propósitos desta investigação têm, sem dúvida, reflexos no que se refere ao estudo das teorias da FQ tanto em nível médio quanto no processo de formação de professores.

Partindo da premissa de que o primeiro passo para a reforma da educação científica é a capacitação do professor, Hadzidaki, Kalkanis e Stavrou (2000) desenvolveram um projeto na Universidade de Atenas com o objetivo de promover junto aos estudantes (professores em formação) uma abordagem qualitativa dos conceitos da FQ. Esse projeto se constitui em uma tentativa de reformulação do ensino de modo a permitir aos estudantes a discriminação entre pressupostos conceituais de Física Clássica e da FQ. Seguindo uma perspectiva kuhiana e comparando as estruturas conceituais dos alunos às teorias científicas, os autores propõem que o processo de

ensino deve provocar uma crise em situações onde conceitos pertencentes a paradigmas distintos estão em disputa. Assim, ao considerar o átomo de hidrogênio como conceito central, os modelos representativos (modelo semiclássico de Bohr e modelo aceito pela Física Moderna) dos dois paradigmas competitivos (Física Clássica e FQ) devem revelar as profundas diferenças conceituais envolvidas. A partir da visualização em computador dos orbitais do átomo de hidrogênio foi realizada a representação clássica do mesmo e, posteriormente, contrastada com o modelo de átomo da FQ.

Segundo os autores, situações como a impossibilidade de usar noções como estado de um sistema clássico ou obter simultaneamente valores bem determinados para *momentum* e posição (rompendo com a ideia de órbita) permitem que os estudantes ampliem seu conhecimento através de um processo de reconstrução. Dando continuidade a esse projeto, Karakostas e Hadzidaki (2005) promoveram uma discussão filosófica (realismo científico *versus* construtivismo) sobre a realidade física no ensino de FQ. São apresentados argumentos que visam romper tanto com a ideia de que os objetos da ciência sejam construções pessoais quanto com a visão da ciência enquanto construção social. Da mesma forma, a interpretação realista da FQ é apontada como viável para revelar o significado do conteúdo científico da teoria mas, por outro lado, isso requer o abandono ou, pelo menos, a revisão da concepção clássica da realidade física e seus pressupostos metafísicos. A conclusão dos autores é de que a estrutura de 'níveis de realidade' é uma alternativa possível para que os estudantes consigam discriminar o conteúdo das teorias científicas.

A questão curricular é o ponto central da análise realizada por Araújo e Rodrigues (2001) em relação ao ensino da FMC e da FQ. A partir da análise dos principais livros-texto usados nessas disciplinas os autores apresentam argumentos que reforçam a importância do estudo da FMC nos cursos de licenciatura e salientam que a FQ, que é uma exclusividade dos cursos de Bacharelado em Física, é tradicionalmente apresentada a partir de um tratamento mais direcionado a aspectos formais da teoria.

Preocupadas com a questão do currículo de Física, Lobato e Greca (2005) fizeram uma análise dos currículos oficiais do ensino secundário de Portugal, Espanha, França, Reino Unido, Dinamarca, Suécia, Canadá, Austrália, Itália e Finlândia a fim de verificar como os conteúdos relacionados à teoria quântica são tratados. As autoras verificaram que a abordagem desses conteúdos nos currículos analisados já está consolidada e que

há uma diversidade tanto em relação aos conteúdos quanto às diversas formas como os mesmos estão distribuídos e são tratados. Esse estudo faz parte de nossa revisão bibliográfica pelo fato de o mesmo sinalizar para a necessidade de se investigar também a maneira como ocorre a formação científica dos docentes, os quais terão que trabalhar com estes currículos. Se essa preocupação quanto a formação científica do docente aparece em um estudo realizado em países onde os currículos já abordam a teoria quântica, ela também vale para o nosso contexto de formação, onde a consolidação da FQ está longe de ocorrer, uma vez que o pouco que se verifica desses conteúdos é a abordagem da velha FQ.

Ostermann e Prado (2005) analisaram o fenômeno da interferência quântica em um IVMZ considerando as principais interpretações da FQ (ondulatória-realista, dualista-positivista, dos muitos mundos, dualista-realista). A partir de uma discussão tanto da estrutura matemática para descrever a interferência com um fóton, quanto dos aspectos teóricos do fenômeno, a interpretação dos muitos mundos recebeu uma ênfase especial. Com a abordagem apresentada, as pesquisadoras propõem que este material sirva como uma das referências a serem utilizadas na formação inicial e continuada de professores.

Ricci, Ostermann e Prado (2007) relatam o desenvolvimento de um *software* para simulação do IMZ, o qual ainda é utilizado em disciplinas introdutórias de FQ na UFRGS, e realizam uma análise do regime clássico (ondulatório) da luz neste dispositivo. Os autores descreveram o papel desempenhado pelos filtros polaroides e os efeitos de difração da luz a partir de uma descrição matemática conectada a aspectos conceituais da teoria quântica, destacando que esta abordagem lhes deu suporte para a implementação da simulação em regime quântico. Esse estudo revela importância por oferecer um aporte teórico, tanto a professores quanto aos demais interessados, por destacar a utilização deste poderoso recurso computacional para ensino de conceitos de FQ.

O estudo de Singh (2008b) trata-se de uma pesquisa *survey* realizada com 202 estudantes de pós-graduação em Física, no início do semestre em que estavam cursando FQ. Essa pesquisa foi realizada em sete universidades e o seu objetivo era conhecer quais são as dificuldades em compreender conceitos de FQ. A avaliação da mesma foi realizada a partir de entrevistas semiestruturadas com 15 estudantes, dentre os quais havia aqueles que estavam na pós-graduação ou em cursos mais avançados

de FQ em nível de graduação. Nessas entrevistas, havia uma lista de questões qualitativas e os estudantes deviam expressar seu raciocínio enquanto tentavam responde-las. As dificuldades compartilhadas pelos estudantes foram agrupadas nas seguintes categorias: a) dificuldades com evolução temporal da função de onda (devido a ênfase exagerada na equação de Schrödinger independente do tempo) e generalização das propriedades dos estados estacionários para estados não estacionários; b) falta de compreensão da análise de Fourier e dificuldades em interpretar a superposição linear de funções; c) desconheciam, ou não recordavam, a interpretação do valor esperado numa medição como sendo a média sobre um conjunto; d) não perceberam que o valor esperado de um observável pode ser calculado a partir do conhecimento de probabilidade na medição de diferentes valores desse observável; e) não fazem a distinção entre vetores no espaço real do laboratório e o espaço dos estados no experimento de Stern-Gerlach; f) dificuldades na representação das funções de onda no diagrama de energia potencial. A partir dos resultados desse estudo, Singh (2008a) (SINGH, 2008a) desenvolveu e avaliou tutoriais interativos para serem utilizados no ensino da FQ em nível de graduação.

Hadzidaki (2008) ao apontar que o ensino de FQ tem sido falho em diversos aspectos, propôs uma estratégia de ensino com um foco ontológico e epistemológico das teorias filosóficas relacionadas à sua compreensão. Assim, ao defender a ciência como empreendimento humano, propõe a abordagem da FQ num viés histórico desde o nascimento da teoria até o auge da compreensão da natureza do mundo microscópico que ela tem possibilitado. Mesmo que o estudo apresentado seja uma proposta de ensino, o autor defende o potencial da mesma como forma de propiciar uma compreensão mais qualitativa da FQ e inserir os estudantes na cultura científica.

Interessados em investigar as perspectivas de professores em relação ao uso da História e Filosofia da Ciência na abordagem da FQ, Nashon, Nielsen e Petrina (2008) realizaram um estudo em uma turma com 16 professores de Física em formação. Estes professores eram desafiados a identificar os tópicos que consideravam mais problemáticos no que se refere ao seu ensino e aprendizagem, além de identificar quais poderiam ser estudados a partir de uma perspectiva da História da Ciência. A partir do uso de questionários, entrevistas e da observação participante, os autores concluíram que a FQ configurava entre estes tópicos. Os professores participantes da pesquisa sugeriram o uso de histórias curtas para motivar os estudantes, uso de biografias, história

das equações de Fermi-Dirac e Bose-Einstein e discussões sobre o desenvolvimento mundial a fim de mostrar as potencialidades da ciência. Além disso, os professores demonstraram estar preocupados em relação a carga horária, pouco interesse dos estudantes, conhecimento limitado da Física por parte dos professores bem como a noção do que é a ciência.

Também interessados em investigar as percepções quanto ao ensino de Física, Rezende Jr. e Souza Cruz (2009) discutiram a relação entre as perspectivas de alunos de Licenciatura em Física quanto à introdução de temas de FMC no Ensino Médio, contrastando-as com a formação inicial dos mesmos e a realidade escolar vivenciada. Nessa pesquisa, realizada nos estados de Minas Gerais e Santa Catarina por meio de entrevistas semiestruturadas, os autores apresentaram argumentos que deixam claro que a formação do professor em relação à FQ necessita ser melhor concebida. Isso ficou evidente quando muitos dos entrevistados, os quais estudaram conteúdos de FMC em sua formação, defenderam a ideia de que estes conteúdos devem ser desenvolvidos ao final do Ensino Médio, respeitando-se pré-requisitos e a evolução histórica, além de necessitarem de uma abordagem de caráter informativo.

Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) realizaram uma pesquisa a fim de avaliar a inserção da FMC no Ensino Médio antecipando que os professores assumem, mesmo que de forma inconsciente, que a mesma tem uma base teórica extremamente difícil de ser compreendida. A partir da análise do discurso de cinco professores de Física, procuraram avaliar se estes introduziriam FMC nas suas aulas e o quanto estas possibilidades de inserção estavam associadas às suas formações. Embora todos os professores tenham cursado pelo menos duas disciplinas de FMC em nível de graduação, os pesquisadores verificaram que não existe nenhum entusiasmo para promover uma inserção efetiva desses tópicos. Ao citarem Lévy-Leblond⁶¹ (2002 *apud* MONTEIRO, NARDI e BASTOS FILHO, 2009, p. 576) defendem que o mais importante não é apenas modernizar a qualquer custo os conteúdos, mas promover a compreensão do que é a ciência, bem como seus métodos de investigação, desafios epistemológicos e suas implicações sociais. Isso vai ao encontro do conhecimento que se tem produzido em termos de pesquisa em ensino de Física atualmente. O ensino de FMC, especialmente de FQ, seria uma bela forma de construir toda esta visão de ciência que

⁶¹ LÉVY-LEBLOND, J. M. É possível ensinar a física moderna na educação básica? In: MORIN, E. (Org.). A religião dos saberes: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. p. 69-72.

é defendida, retomando o que descrevemos anteriormente como sendo um currículo mais atual.

Em outro trabalho, Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2013) discutem a formação do professor de Física no que diz respeito à FMC. Essa discussão ocorreu a partir de um estudo qualitativo, com entrevistas semiestruturadas a dez professores de Física e análise discursiva à luz da teoria da ação comunicativa de Habermas e da ação dialógica de Paulo Freire. Todos os professores haviam cursado, durante a graduação, as disciplinas de Física Moderna (Teoria da Relatividade) e Estrutura da Matéria (FQ) e, no tocante a esse artigo, questionou-se sobre o processo de formação a que foram submetidos. Os autores concluem que há um descompasso entre a formação de professores em FMC e as exigências atuais da educação básica. Enquanto a escola deve ofertar uma educação emancipatória, os professores, em suas trajetórias formativas, foram submetidos a uma educação baseada na racionalidade técnico-instrumental, com sequências didáticas pré-determinadas pelos livros-texto e avaliações baseadas na repetição de esquemas previamente estudados. Isso sinaliza para a necessidade de se repensar a organização curricular nas licenciaturas em Física, enfatizando o processo de construção dessa ciência, de suas implicações e valorizando momentos relacionados à atuação enquanto futuro professor na educação básica.

Carr e McKagan (2009) apresentaram um estudo relacionado a quatro aspectos principais nos quais o ensino de FQ em nível de pós-graduação poderia ser melhorado. Esses aspectos são o conteúdo do curso, o livro didático, os métodos de ensino e os instrumentos de avaliação. Para isso, embasaram-se em estudos anteriores realizados durante três anos na Escola de Minas do Colorado⁶², inovando em todos os aspectos citados. No primeiro ano da pesquisa, prevaleceu o currículo padrão, tendo o livro *Modern Quantum Mechanics* (de J. J. Sakurai) como referência. Nos dois anos seguintes, foram adicionados outros materiais, que abordavam o estudo dos postulados da FQ, o tratamento completo do formalismo do operador densidade, emaranhamento, introdução à teoria quântica de campos e aplicações em Física Nuclear, Óptica e Física do Estado Sólido, polarização e um tratamento mais formal do espaço de Hilbert em infinitas dimensões. Em função da significativa e simultânea mudança tanto no conteúdo quanto nos aspectos pedagógicos do curso, os autores consideraram que não é possível

⁶² Faculdade voltada às áreas de Ciência, Matemática e Engenharia e que busca, através da pesquisa, a solução para problemas relevantes para a sociedade, conforme informações no *site* da instituição, no endereço: <<http://www.mines.edu/ProspectiveStudents>>.

atribuir os efeitos da mudança a um aspecto isolado, indicando a necessidade de estudos mais detalhados.

Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009a) analisaram as interações discursivas de estudantes de Licenciatura em Física em uma atividade didática mediada pelo IVMZ. Foram analisadas, à luz do referencial sociocultural, as tensões nos enunciados dos alunos, além de se avaliar em que medida os significados em FQ são criados e desenvolvidos em sala de aula por meio do uso da linguagem e de instrumentos semióticos. Com essa investigação, os pesquisadores evidenciaram que, nas atividades colaborativas com uso do IVMZ enquanto ferramenta mediadora, sempre há um aluno que assume o papel de parceiro mais capaz e que as explicações deste frequentemente apresentam características de fala egocêntrica. O estudo também revelou que as ações mediadas pelo uso do IVMZ se deram na zona de desenvolvimento proximal, levando à construção e à negociação de novos significados.

O trabalho de Ostermann *et al.* (2009) consiste em um '*position-paper*' no qual a dualidade onda-partícula é defendida como conceito central para a introdução da FQ no Ensino Médio. Para isso, apresentaram os fundamentos que sustentam esta teoria a partir do IVMZ, tendo como porta de entrada a analogia com a óptica ondulatória clássica. Nesse trabalho, exploraram as possibilidades oferecidas pelo *software* como recurso didático para a introdução do conceito de dualidade onda-partícula e da interpretação probabilística da FQ e apresentaram também alguns problemas relacionados à formação dos licenciandos em Física e sua relação com a inserção desta teoria no Ensino Médio. Com este trabalho, realizado a partir da perspectiva sociocultural, os pesquisadores propuseram estratégias capazes de superar aquelas que se baseiam em uma mescla de sequência histórica e comportamento corpuscular e que acabam reforçando as noções clássicas que o estudante carrega consigo.

Em um estudo realizado com licenciandos em Física, Souza *et al.* (2010) investigaram se o pensamento transdisciplinar contribui para a compreensão do princípio da dualidade da luz e utilizaram como metodologia o ciclo da experiência de Kelly. O objetivo da intervenção realizada foi engajar os alunos em um processo de aprendizagem com o auxílio de algumas atividades experimentais, visando a discussão sobre os caracteres ondulatórios e corpusculares da luz. As conclusões desse estudo são que as concepções prévias dos alunos sobre a dualidade da luz são incoerentes e que os

experimentos realizados, bem como a oficina sobre transdisciplinaridade, contribuíram para que os estudantes tivessem maior compreensão deste comportamento.

Mason e Singh (2010) discutiram um estudo de caso realizado com 14 estudantes em final de graduação em Física, através de um curso de FQ. Os alunos receberam quinze semanas de aula em um formato tradicional, mas foram orientados a trabalhar em tutoriais que estavam sendo desenvolvidos. Ao longo do curso, os alunos foram submetidos a duas seções intercaladas de resolução de problemas (com as mesmas questões) e a um exame final (metade das questões iguais às etapas intermediárias), sendo que após cada avaliação intermediária os alunos recebiam as soluções destes problemas.

Ao final do curso, a comparação do desempenho entre as avaliações intercaladas e o exame final tanto dos alunos iniciantes quanto dos alunos avançados revelou que aqueles que estão em níveis mais avançados não usam os seus erros como oportunidade para novas aprendizagens, reparação, extensão e organização de sua estrutura cognitiva. As entrevistas com os alunos revelaram diferentes atitudes frente à solução de problemas, além do fato de esses não exercitarem a prática reflexiva como oportunidade para o próprio aprendizado. Nesse sentido, os autores acreditam que ao pedir aos alunos para que expliquem por que um determinado princípio ou conceito é relevante para a resolução de um problema estarão forçando-os a refletir e, assim, construir uma estrutura cognitiva mais sólida.

Preocupado com a abordagem errônea do efeito fotoelétrico que é realizada na introdução ao estudo da FQ Klassen (2011) apresentou, na forma de uma história intitulada 'O nascimento do fóton', cinco episódios que considera como sendo fundamentais para constituir um retrato preciso deste fenômeno. Estes episódios são: a) a descoberta do efeito fotoelétrico; b) a caracterização da explicação inicial para o efeito fotoelétrico; c) o papel revolucionário de Einstein ao propor o *quantum* de luz para explicar o fenômeno e a rejeição à sua hipótese; d) a verificação experimental da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico por Millikan, mesmo não aceitando a hipótese do *quantum* de luz; e) as medições de Compton e sua contribuição para a aceitação da hipótese de Einstein. Segundo o autor, é preciso retratar fielmente a compreensão do conceito de fóton nos materiais instrucionais que exploram esse fenômeno físico.

Em outro estudo sobre o ensino do efeito fotoelétrico, Klassen *et al.* (2012) analisaram 38 manuais de laboratório, considerando 4 critérios e sendo cada critério classificado como excelente, satisfatório, menciona e não menciona. Os critérios utilizados e o percentual de manuais que não os mencionam foi o seguinte: a) hipótese do *quantum* de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico (61 por cento dos manuais); b) a falta de aceitação da hipótese do *quantum* pela comunidade científica (100 por cento); c) determinação experimental da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico e da constante de Planck, realizada por Millikan (92 por cento); d) os pressupostos de Millikan sobre a natureza da luz (100 por cento). A constatação dos pesquisadores é de que os manuais de laboratório analisados acabam servindo como ‘livros de receita’, prejudicando as aulas experimentais e, conseqüentemente, privando os estudantes do conhecimento de relações conceituais e contextuais desde a introdução da FQ. Esse estudo, embora não se trate de uma pesquisa realizada diretamente com professores em formação, traz resultados que têm importante relação com este contexto, uma vez que a componente experimental é algo presente nos cursos de licenciatura.

Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2011) apresentaram um estudo sobre a ocorrência da fala privada em alunos de Licenciatura em Física da UFRGS. A partir da análise discursiva bakhtiniana dos dados obtidos em outros estudos nos quais os alunos executaram uma tarefa mediada pelo IVMZ, buscaram investigar como o processo de mediação é utilizado na resolução de problemas conceituais de FQ explorados com o *software*. Com esse estudo, foi possível evidenciar que a fala privada surgiu tanto da interação dos estudantes com as ferramentas (*software*) quanto da interação com o roteiro. Em relação ao *software*, a fala privada assumiu um caráter sinalizador utilizado para indicar a realização dos procedimentos e, por meio da interação com o roteiro, a mesma serviu como recurso para o planejamento das ações.

Em pesquisa realizada no âmbito de uma tese de doutorado, Pereira e Ostermann (2012b) investigaram, junto a um grupo de alunos de Licenciatura em Física, o papel da mediação textual no ensino de ciências. A partir da análise do discurso, fundamentada na abordagem sociocultural de Wertsch, os autores se basearam nas respostas dos alunos a um teste escrito sobre temas de Física Moderna para afirmar que os recursos textuais empregados trouxeram muitas restrições à formulação de uma resposta adequada ao problema proposto pelo professor. Além disso, esse estudo, conduzido no âmbito de uma disciplina de introdução à Física Moderna, evidenciou a existência de

lacunas na formação dos estudantes, visto que alguns sequer conseguiam dominar conceitos de Física já estudados em disciplinas anteriores.

A fim de promover uma inovação na forma de tratar aspectos bastante abstratos da FQ e que normalmente são abordados com uma forte referência aos aspectos matemáticos da teoria, Pereira *et al.* (2012) fizeram uma discussão dos postulados da FQ do ponto de vista conceitual e fenomenológico. Nesse trabalho, buscaram traduzir o formalismo matemático associado aos postulados em uma linguagem que pode ser útil para a compreensão da teoria quântica. Após uma apresentação tradicional dos postulados, tal como aparece nos livros, os autores fizeram uma discussão da FQ a partir dos dispositivos presentes em diferentes configurações do IVMZ e retomaram estes postulados sugerindo uma abordagem operacional para os mesmos durante a simulação do fenômeno da interferência quântica. Utilizando a versão do IVMZ produzida pelo grupo entre 2004 e 2007, os autores exploraram a inserção de filtros polaroides e detectores a fim de promover uma ampla discussão dos postulados da FQ. Os autores desse artigo defendem que esta abordagem pode ser feita no Ensino Médio, uma vez que possibilita a compreensão de conceitos que, tradicionalmente, se restringem ao formalismo matemático.

Tendo como pano de fundo a análise de uma atividade mediada por um IVMZ e realizada com estudantes de Licenciatura em Física, Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2012) apresentaram um estudo acerca da distribuição social da mente em uma aula sobre FQ. No âmbito de uma disciplina que visava a revisão de conceitos de FMC, os pesquisadores investigaram, a partir da perspectiva sociocultural para a cognição distribuída, os processos interpsicológicos evidenciados durante a realização de uma tarefa com o *software*. Na análise de discurso bakhtiniana dos diálogos gravados entre os alunos, os pesquisadores evidenciaram um intrincado processo de interanimação de vozes. Assim, a solução dos problemas apresentados aos alunos não pode ser atribuída a um indivíduo isolado, mas ao grupo, demonstrando o processo de distribuição social da mente.

Com o foco também voltado à formação ao ensino superior, Ronde (2014) apresenta um projeto que, entre outros aspectos, se dedica a investigar no âmbito da FQ, como a trama de fundamentos metafísicos e políticos interfere nas relações de saber/poder em termos de conhecimento científico e tecnológico na América Latina. Segundo o autor, tais fundamentos formam a base de desenvolvimento da ciência e da

tecnologia contemporâneas e a análise do desenvolvimento da Física do século XX, a partir do Projeto *Manhattan* e da *Big Science*, ajuda a compreender a transformação das noções de representação e experiência neste período. O referencial teórico utilizado nesta investigação envolve autores da Filosofia e Política, Sociologia da Ciência, Filosofia da Ciência e História da Ciência. No que tange ao ensino universitário, a proposta de pesquisa busca tecer considerações, a partir da análise de livros-texto, sobre a forma como o problema da representação na FQ deslocou-se para o viés técnico-instrumental ao invés de promover novas representações físicas e sentidos. Este projeto de investigação vai ao encontro da análise realizada por Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2013) em relação à formação docente.

Asikainen e Hirvonen (2014) a partir de um estudo envolvendo professores de Física (9 em formação e 18 em serviço) descrevem o uso de um experimento de pensamento da dupla fenda como ferramenta para investigar o conhecimento sobre os fenômenos envolvidos. A pesquisa consistiu na realização de um teste escrito sobre o tema com todos os professores e entrevista com três deles. A partir da análise de conteúdo dos dados coletados os autores discutem: a) as concepções dos professores sobre o experimento da dupla fenda (relação entre comprimento de onda e largura das fendas); b) os padrões de resposta de professores em formação e em serviço em relação a distribuição de intensidade no experimento com partículas clássicas, luz e elétrons; c) o significado atribuído à dupla fenda. O estudo revelou que: a) cerca de 40 por cento dos participantes (em cada grupo) consideram que as dimensões das fendas são irrelevantes; b) a representação dos padrões de detecção nos anteparos revela que a maioria dos professores leva em consideração o comportamento corpuscular para as partículas clássicas (cerca de 60 por cento dos professores) e quando se utiliza luz ou elétrons apenas 40 por cento dos professores reconhece o comportamento dual. Os autores sugerem que seja dada mais atenção à discussão do experimento da dupla fenda na formação de professores que, apesar da sua simplicidade, contribui para a compreensão do comportamento dual da luz.

Também em torno do comportamento dual da luz está a discussão de Cheong e Song (2014), que apontam a falta de consenso sobre o verdadeiro significado da dualidade onda-partícula e sobre a interpretação da teoria quântica, dadas às discussões em torno da noção de 'realidade'. Os autores apontam a existência de três níveis de significado para a dualidade, cuja interpretação ocorre: a) alheia a conceitos da teoria

quântica como a função de onda e a interpretação probabilística do formalismo, destinando-se a explicação de resultados experimentais; b) a partir do uso dos conceitos apenas para previsão de fenômenos, sem estabelecer vínculos com a 'realidade' dos objetos quânticos ou com a medição; c) como estando atrelada à 'realidade' e ao papel da teoria quântica (por exemplo, a interpretação do experimento da dupla fenda segundo a visão da escola de Copenhague e a Mecânica Bohmiana). A proposta para superar essa fragmentação é a adoção de uma perspectiva suspensiva (suspensão de julgamento), onde abandona-se a tradicional divisão entre formalismo e interpretação, dando lugar a uma distinção entre as regras de previsão e a interpretação relacionada à realidade (segundo e terceiro níveis de significados, respectivamente). No caso do experimento da dupla fenda, uma explicação com base em uma perspectiva suspensiva diria que a função de onda passa através das duas fendas, o que não seria possível de dizer para um elétron já que o comportamento desse objeto quântico e a função de onda não seriam claros. Em relação ao princípio da indeterminação, a perspectiva suspensiva reconhece que a indeterminação é uma regra muito útil para previsões, mas não se filia nem com a concepção de indeterminismo intrínseco nem com a noção da falta de conhecimento do observador sobre as variáveis.

Em nível de graduação, a proposta é de que o ensino da dualidade onda-partícula ocorra de acordo com o segundo nível de significados, na seguinte sequência: compreensão e aplicação do formalismo e regras de predição, interpretação de experimentos fundamentais como Stern-Gerlach e violação das desigualdades de Bell. Os benefícios apontados pela adoção da perspectiva suspensiva ao ensino da FQ, segundo os autores, dizem respeito ao fato de o professor poder abordar a teoria sem se filiar a uma interpretação específica, possibilitando aos alunos as condições necessárias para que esses façam suas escolhas e ainda avaliar o raciocínio envolvido neste processo.

Nesta categoria de análise, 27 trabalhos (35 por cento do total pesquisado) preocupam-se, de um modo geral, com aspectos ligados ao ensino e aprendizagem da FQ seja discutindo resultados da implementação de propostas didáticas ou aspectos epistemológicos ligados ao ensino da FQ. Essas investigações revelam sua importância ao fornecerem subsídios para os demais estudos que são efetivamente testados em sala de aula. Desse total, 17 trabalhos envolvem pesquisas realizadas na segunda metade do período que analisamos (janeiro/2000 a abril/2015), o que revela a crescente

preocupação com o ensino da FQ em nível de graduação. Se compararmos os quantitativos de trabalhos de pesquisa e propostas didáticas, embora não haja uma correspondência direta entre os estudos analisados em cada uma dessas categorias, percebe-se uma uniformidade, ou seja, para cada proposta didática que é produzida uma investigação teórica é realizada.

4.2.5 Levantamento de concepções em FQ

Existe uma grande quantidade de estudos voltados às concepções espontâneas em Física Clássica. Em FQ a literatura também apresenta algumas investigações com objetivos direcionados ao levantamento e análise de concepções.

Com o objetivo de investigar as dificuldades dos estudantes de graduação, Singh (2001) desenvolveu um curso avançado de FQ e ministrou a 89 estudantes, de 6 universidades, envolvendo os conceitos relacionados à medição e evolução temporal. A análise dos testes aplicados a todos os participantes e das entrevistas com nove destes estudantes revelou que, apesar dos diferentes estilos de ensino e livros didáticos, as dificuldades apresentadas pela maioria eram as mesmas. Os conceitos relacionados a estados estacionários, autoestados e dependência temporal de valores esperados foram apontados como os mais difíceis de serem assimilados, assim como ocorre em cursos de FQ em nível introdutório.

Tendo como pano de fundo os quatro grandes grupos de interpretações da FQ, Montenegro e Pessoa Jr. (2002) aplicaram, a alunos de cinco turmas de graduação e três turmas de pós-graduação, um questionário formado por perguntas abertas e fechadas. Estas versaram sobre o experimento da dupla fenda, princípio da indeterminação, interpretação do estado quântico, retrodição⁶³ e postulado da projeção. A partir da análise dos questionários visando estabelecer correlações entre as respostas e também por meio de entrevistas com alguns alunos, os autores concluíram que estes utilizavam diferentes interpretações ou mesmo misturavam interpretações sem muita coerência ao analisarem diferentes problemas em FQ.

Cataloglu e Robinett (2002) investigaram como a compreensão de alguns conceitos centrais da FQ se desenvolve ao longo de um curso de graduação a partir da aplicação, a 160 alunos, de um instrumento de avaliação (*Quantum Mechanics Visualization Instrument – QMVI*) composto por 25 questões objetivas. Estas questões

⁶³ Na FQ, a retrodição se refere a possibilidade de fazer inferências em relação a alguma situação passada.

envolviam representações gráficas (funções de onda, distribuições de probabilidade e energia potencial *versus* posição) e exigiam a justificação das respostas bem como a expressão do nível de concordância do aluno em uma escala, semelhante à escala *Likert*. Ao avaliar como evolui o processo de compreensão, os autores concluíram que existem diferenças quando a forma como os alunos de diferentes cursos encaram os problemas no QMVI. Por exemplo, problemas envolvendo níveis de energia são mais familiares a alunos de cursos de Química, enquanto alunos em cursos de Física têm mais facilidade em problemas que tratam de diagramas de energia potencial. Os autores ainda propõem que a compreensão da FQ pode ser facilitada usando-se recursos apropriados, que tenham como foco questões conceituais ou representações através de animações via *Web*, sinalizando para a necessidade de se investir mais na produção de novos materiais didáticos.

Moreira, Hilger e Präss (2009) apresentam os resultados de uma pesquisa sobre representações sociais da Física e da FQ, realizadas a partir de testes de associação escrita e numérica de palavras, técnicas de escalonamento multidimensional e análise de agrupamentos hierárquicas. Das 2000 palavras obtidas em pesquisas anteriores foram selecionadas 5 relacionadas a Mecânica Quântica (FQ, indeterminação, partícula, probabilidade e quântica) e 5 palavras comuns (alma, espiritualidade, pensamento, sobrenatural e êxito), a partir da frequência com que apareceram. Estas passaram a compor um questionário que foi aplicado a 530 estudantes. Os dados relacionados aos estudantes do curso de Física mostram uma grande diferença entre as palavras mais citadas quando comparados com estudantes do primeiro e do último ano. Enquanto os estudantes do primeiro ano associam a Mecânica Quântica à partícula, energia, *quantum*, incerteza e átomo, os estudantes do último ano associam à incerteza, probabilidade, equação de Schrödinger, dualidade onda-partícula e quantização. Além disso, os estudantes do último ano conseguem se distanciar mais das palavras comuns em suas representações quando comparados aos demais. Segundo os autores da pesquisa, é importante considerar o universo propagado pelas 'quânticas alternativas', visto que estas têm implicações sobre a aprendizagem dos estudantes.

Stefani e Tsaparlis (2009) investigaram as concepções de 19 estudantes do segundo ano de um curso universitário na Grécia sobre conceitos como orbitais atômicos, equação de Schrödinger, orbitais moleculares, hibridização e ligação química. A estratégia metodológica utilizada na pesquisa foi a fenomenografia. Os estudantes

foram entrevistados, com registros feitos em áudio, que posteriormente foram analisados, resultando na organização de subcategorias, segundo níveis de explicação e níveis de modelos utilizados, e busca de relações entre elas. Os resultados foram interpretados à luz da teoria da aprendizagem significativa e, considerando a existência de inferências causais em suas explicações, os estudantes foram distribuídos em quatro categorias. Nas duas categorias associadas à aprendizagem mecânica encontravam-se 6 estudantes e como pertencentes às categorias associadas à aprendizagem significativa havia 13 estudantes. Segundo os pesquisadores, enquanto os enunciados formulados pelos próprios estudantes são indícios de aprendizagem significativa, a repetição de frases próprias de livros texto e concepções associadas à velha FQ sinalizam para uma aprendizagem mecânica.

Em uma pesquisa realizada com 14 estudantes do sétimo semestre de Licenciatura em Física na UFRGS, Pereira, Cavalcanti e Ostermann (2009) investigaram as concepções sobre a dualidade onda-partícula a partir de um instrumento constituído de 16 questões objetivas. Esse teste, cujas questões versavam sobre efeito fotoelétrico, experimento de dupla fenda e o IMZ, foi previamente validado junto a especialistas na área e aplicado a alunos de graduação e pós-graduação que tivessem cursado pelo menos uma disciplina de FQ introdutória. A fidedignidade do mesmo foi estimada a partir do coeficiente alfa de Cronbach, que resultou em 0,77. Essa pesquisa evidenciou que a maioria dos estudantes têm dificuldades em reconhecer em quais situações os objetos quânticos apresentam comportamento corpuscular ou ondulatório.

Wuttiptom *et al.* (2009) apresentaram um questionário, baseado em 25 questões de múltipla escolha, que foi aplicado a 312 estudantes da Universidade de Sydney. Trata-se de uma pesquisa *survey* que buscou investigar a compreensão dos estudantes em relação a conteúdos introdutórios de FQ, organizados em cinco temas (efeito fotoelétrico, ondas e partículas, comprimento de onda de De Broglie, interferência em fenda dupla e princípio da incerteza). O questionário passou pela análise de físicos com mais de 20 anos de experiência em ensino de Física para sua validação e por cinco testes estatísticos (dois para avaliação da fidedignidade e três para avaliação da dificuldade e poder discriminatório). A coleta de dados ocorreu na forma de pré e pós-teste, aplicado a estudantes de primeiro e segundo ano da universidade. Os autores defendem que instrumento utilizado pode ser utilizado para avaliar o grau de entendimento do estudante no início e no fim do curso. No caso da amostra analisada, o maior percentual de acertos

em questões procedimentais quando comparado às questões conceituais sinaliza para aprendizagens mecânicas por parte dos estudantes. Além disso, concluem que o fato de alunos do segundo ano errarem questões que não haviam sido estudadas novamente demonstra que o tratamento da FQ em níveis mais elevados e com abordagens tradicionais não implica na compreensão de aspectos básicos da teoria.

Zhu e Singh (2012) investigaram as dificuldades apresentadas por estudantes de graduação e de pós-graduação com relação à Mecânica Quântica não-relativística de uma única partícula em uma dimensão espacial. Esta pesquisa foi realizada através da aplicação de um teste em 10 universidades nos Estados Unidos, a 226 estudantes que haviam cursado, pelo menos, um semestre de FQ. Esse teste, composto por 31 questões e desenvolvido à luz de trabalhos anteriores (SINGH, 2001; 2008a), tratou de temas que envolviam valor esperado de um observável físico e sua dependência temporal, estado de um sistema quântico, medição, estados estacionários e não-estacionários, hamiltonianos, função de onda admissível como solução, entre outros. Os resultados indicam que as concepções mais comuns entre os estudantes de graduação e pós-graduação são: a) somente certas funções de onda são permitidas, de modo que aquelas que não são expressas explicitamente como uma superposição linear dos autoestados de energia são descartadas [por exemplo, $\psi(x) = A \sin^2(\pi x/a)$]; b) os valores esperados dos operadores posição e *momentum* dependem do tempo em um estado estacionário; c) em sistemas quânticos em que a energia potencial varia de repente, o estado fundamental anterior evolui para um novo estado estacionário; d) o operador hamiltoniano determina a forma de uma autofunção de posição (o que sugere a incompreensão de um estado estacionário como um autoestado de qualquer operador correspondente a um observável físico); e) a equação de Schrödinger independente do tempo é satisfeita para qualquer função de onda possível; f) a atuação do operador hamiltoniano em um estado representa uma medição de energia; g) a medição da energia imediatamente após uma medição de posição fornece valores de energia anteriores à medição da posição; h) a função de onda retorna automaticamente para o estado original após decorrido um longo período de tempo da medição. Para auxiliar os alunos, tanto de graduação quanto pós-graduação, os autores sugerem a utilização de tutoriais desenvolvidos em pesquisas anteriores (SINGH, 2008a).

A pesquisa sobre concepções em FQ, apesar dos poucos estudos dedicados a esta temática, tem revelado aspectos muito importantes sobre a imagem que os

estudantes constroem do mundo quântico e que precisam ser levadas em consideração pelos seus professores ao adentrarem neste universo conceitual.

De todos os trabalhos analisados, os conceitos da segunda revolução da FQ (não-localidade, emaranhamento quântico, desigualdades de Bell) estão presentes em 14 deles (18 por cento) sendo: duas propostas didáticas implementadas em sala de aula, duas propostas não-implementadas, 3 artigos de pesquisa e 7 propostas experimentais para introdução da FQ.

5 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

A pesquisa apresentada nesta tese foi realizada tendo como referencial teórico-metodológico conceitos da teoria da mediação de Vygotsky e da filosofia translinguística de Bakhtin. Tal opção se justifica a partir da crença de que a análise de variáveis isoladas conduz à produção de conhecimentos fragmentados acerca do objeto de investigação. Assim, optou-se por uma análise mais ampla, que propicie entender o processo de aprendizagem de conceitos de FQ. Em outras palavras, defende-se que a análise desse processo não pode ser reduzida ao simples desempenho de cada indivíduo em atividades didáticas concebidas e avaliadas isoladamente. A análise individualizada foca naqueles conceitos já desenvolvidos e isso implica perda de informações, por parte do pesquisador, sobre aqueles conhecimentos que estão em processo de aprendizagem.

Deve-se levar em conta todo o processo complexo envolvido nas interações discursivas entre esses indivíduos, que sofre influência significativa não apenas dos discursos dos seus pares, mas de discursos que não necessariamente fazem parte do contexto estrito no qual a análise será desenvolvida (a sala de aula). O desenvolvimento da compreensão se dá necessariamente de forma dialógica (WERTSCH, 1993), pois requer pleno intercâmbio de ideias que fundamentalmente (mas não unicamente) se estabelece fazendo-se uso da linguagem como ferramenta mediadora.

É por meio das interações discursivas, na qual o professor possui papel muito destacado, que se estabelecem possíveis 'rotas dialógicas de aprendizado' dos conceitos físicos envolvidos, que podem ser evidenciadas com uma análise apropriada (como será discutido mais adiante). Assumindo-se essa complexidade de relações que se estabelecem na sala de aula e em função da natureza social do objeto de estudo (o discurso dos estudantes), esta pesquisa está fundamentada no referencial sociocultural.

A teoria psicológica de Vygotsky, considerada como precursora dessa perspectiva, se preocupa, entre outras coisas, em compreender como o domínio de formas socioculturalmente situadas de ação mediada, ou seja, no plano interpsicológico, pode levar a formas mais particulares das mesmas no plano intrapsicológico (WERTSCH, 1993). A translinguística de Bakhtin, por outro lado, pode ajudar a compreender como a contextualização sociocultural da ação mediada se relaciona com o desenvolvimento mental do indivíduo (*op. cit.*). Defende-se aqui que a união entre essas duas teorias pode possibilitar a compreensão do processo de construção colaborativa de conceitos de FQ

em uma atividade mediada pelo IVMZ.

Conforme Wertsch (1993) descreve, a ação humana é um processo mediado, caracterizado pelo emprego de instrumentos mediadores, os quais moldam a ação conferindo-lhes aspectos singulares, orientados dentro de um contexto. Considere-se como exemplo o caso de um estudante que resolve problemas ‘de cabeça’. Neste caso, onde está a mediação? Este estudante já se encontra no final de um longo processo de desenvolvimento de uma função psicológica e para responder a essa pergunta é preciso analisar a história do desenvolvimento dessa função, ou seja, olhar para os indivíduos que estão começando a resolver problemas e a analisar como eles evoluem. Isso significa dizer que se este estudante resolve problemas ‘de cabeça’ hoje, é porque em algum momento no passado ele já fez uso de signos mediados por outras pessoas.

Desta forma, a mente não pode ser separada do meio e isso requer uma abordagem sociocultural, cujo objetivo básico “é elaborar uma explicação dos processos mentais humanos que reconheça a relação essencial entre estes processos e seus cenários culturais, históricos e institucionais” (WERTSCH, 1993, p. 23). O que importa, nessa perspectiva, é compreender as tradições culturais socialmente ensinadas (tipos de discursos e representações úteis, e como usá-los), muito mais do que saber quais mecanismos cerebrais estão sendo utilizados quando se aprende.

Nas seções seguintes deste capítulo será feita uma breve introdução às teorias de Vygotsky e Bakhtin, destacando conceitos fundamentais considerados neste estudo.

5.1 A teoria da mediação⁶⁴ de Vygotsky: aspectos gerais

Os estudos de Lev Semenovitch Vygotsky (1896-1934) podem ser considerados como o ponto de partida para o desenvolvimento da psicologia histórico-cultural, cujo ‘núcleo duro’ reside em três aspectos: método genético experimental, origem social dos processos mentais superiores, importância dos instrumentos e signos como ferramentas mediadoras.

Seus trabalhos visavam a compreensão da psique humana e foram fortemente influenciados pelo pensamento marxista. Assim, o que permeia os seus estudos é a

⁶⁴ A mediação é tratada nos trabalhos de Vygotsky a partir de dois pontos de vista: em termos de estímulo (em função do uso da linguagem social da época em que foram escritos os primeiros trabalhos) e em termos de construções semióticas (usando a linguagem social pertencente a uma tradição da semiótica) (WERTSCH, 2007).

consideração de que as mudanças históricas que ocorrem na sociedade e na vida material são responsáveis por mudanças tanto na consciência quanto no comportamento humano, isto é, fazem parte do contexto sócio-histórico. Equivale a dizer que os fenômenos da psique humana estão diretamente relacionados à vida em sociedade, que apresenta como aspecto central a ação mediada (WERTSCH, 1985; 1993).

Vygotsky procurou caracterizar os aspectos puramente humanos do comportamento e com isso compreender a formação de tais características ao longo da história, ou seja, não estudou os fenômenos em si, mas a gênese dos fenômenos⁶⁵. Para ele, o método dialético tem como princípio fundamental o estudo de algo no seu processo de mudança. No campo das ideias, uma forma de dialética é quando ela se apresenta em uma tríade tese-antítese-síntese (LIMA JR., OSTERMANN e REZENDE, 2014). Uma tese dá origem a uma reação que a nega, a antítese. Dessa tensão, diferentemente de um debate no sentido mais comum, não há um vencedor. Constrói-se a síntese no sentido de resolver a tensão entre a tese e a antítese, mas essa síntese não dá a vitória a um ou a outro: ela propicia a construção de uma nova proposta. Esta nova proposta preserva e concilia algumas partes essenciais dessas ideias, construindo nela não um consenso, mas a superação do conflito com uma nova proposição. É importante que se tenha em mente que a nova proposição não é um consenso, mas algo novo.

Na teoria de Vygotsky, cabe destacar que os contextos social e histórico influenciam diretamente o desenvolvimento psicológico e não podem ser analisados separadamente. Por outro lado, o desenvolvimento cultural só pode ocorrer a partir da interação do homem no seu contexto social, de modo que ele possa compartilhar suas vivências e tomar conhecimento de experiências vividas por outros agregando novos aspectos culturais à sua formação.

Vygotsky foi o primeiro psicólogo do século XX a propor que a complexidade na compreensão da psique humana é fruto do desenvolvimento fortemente arraigado em relações entre o indivíduo e seu contexto histórico, social e cultural. Para ele, a psicologia do final do século XIX e início do século XX desconsiderava o caráter social e histórico dos fenômenos psíquicos. Nesse aspecto reside outra forma de dialética, que consiste em analisar fenômenos complexos sem tratar isoladamente suas partes fundamentais

⁶⁵ No caso da pesquisa que realizamos, o público-alvo foram alunos que ainda não haviam estudado FMC e as diversas situações criadas ao longo do estudo possibilitaram analisar como os conceitos trabalhados se desenvolveram. Isso equivale, na teoria de Vygotsky, à análise dos comportamentos em desenvolvimento, ao invés da análise das estruturas já fossilizadas.

(postura atomista, bastante difundida na psicologia no final do século XIX e início do século XX), mas dando atenção primordial às relações e tensões entre essas partes.

Ao se opor à análise atomista na psicologia da época, Vygotsky fez a analogia com uma análise da água, que se concentrasse em examinar fundamentalmente os átomos de hidrogênio e oxigênio (suas partes fundamentais). A análise do todo não pode ser reduzida à análise das partes fundamentais, uma vez que esse todo não é redutível a essas partes (há propriedades e relações entre as partes que obviamente não são constituintes de cada parte isolada). Assim, uma análise pormenorizada das partes não pode, de forma alguma, substituir uma análise do todo (LIMA JR., OSTERMANN e REZENDE, 2014).

Diferentemente de Hegel, cuja dialética reside no campo das ideias (Hegel era idealista), Vygotsky adota a ideia de Marx, porém, ao invés de considerar que é por meio do trabalho e de ferramentas materiais que se modifica o mundo natural, assume que são os fenômenos sociais que modificam a consciência humana. Essas ferramentas, que para Vygotsky são culturais (por serem socioculturalmente situadas), são elementos essenciais na atividade humana.

A dinâmica complexa assumida no sentido de que, por um lado a atividade humana mediada pelas ferramentas culturais transforma o mundo natural e, por sua vez, a transformação desse mundo natural faz com que as ferramentas culturais também evoluam, resulta da tese de que esses processos não podem ser vistos como uma soma de partes isoladas (postura antiatomista) e, portanto, não são livres de relações e tensões. Aliada à noção de ‘movimento mútuo’ e constante evolução cíclica⁶⁶ tem-se a essência da dialética hegeliana, porém transposta para um contexto materialista ao invés do contexto originalmente idealista de Hegel. São esses fundamentos que embasam o materialismo dialético, fundamental tanto na obra de Marx quanto na de Vygotsky.

Conforme destaca Romanelli (2011),

Da mesma forma que Marx, em *O Capital*, analisou algumas categorias genéricas da economia capitalista (como, por exemplo, a mercadoria), procurando estudá-las dialeticamente para assim desvendar o funcionamento social, Vygotsky também procurou estudar dialeticamente categorias ou estruturas específicas do ser humano que pudessem desvendar o

⁶⁶ Embora Hegel assumisse essa dinâmica cíclica, o círculo, que é uma curva fechada, não seria a analogia geométrica que melhor descreveria essa dinâmica (a ideia de movimento é fundamental e, portanto, não se volta ao mesmo ponto original nesses ciclos). A analogia que se pode adotar é a espiral ascendente (UTZ, 2005), na qual o término de um ciclo se dá sempre em um ponto de nível mais elevado do que o ponto que define seu início.

funcionamento psíquico. Ele as reconheceu nas “funções psíquicas superiores”, ... buscando compreender, na inter-relação dinâmica e no desenvolvimento dessas funções, o processo de formação social da consciência (ROMANELLI, 2011, p. 205).

Como já explicado, o pensamento dialético defendido por Marx e também por Vygotsky, tem seu foco no processo de mudança do objeto de interesse. Segundo Wertsch (1985), Vygotsky diferencia, por meio de quatro aspectos, as funções mentais elementares das superiores: a) a primeira é controlada pelo ambiente e a segunda, pelo indivíduo, por meio da autorregulação; b) a realização consciente de processos mentais, ou seja, o uso do intelecto; c) a origem social das funções mentais superiores; d) o uso de signos como forma de mediação das funções mentais superiores.

Assim, Vygotsky propôs a superação do enfoque naturalista, vigente na psicologia da época, segundo o qual a conduta e a psique humana somente podiam ser compreendidas de um ponto de vista natural, como um processo causado e explicado pela natureza. O homem era visto como estando desvinculado de aspectos sociais.

Frente à importância do contexto sociocultural como algo que constitui e molda o processo de desenvolvimento, aliado ao fato de que a principal ferramenta mediacional humana é a linguagem, a fala e as interações discursivas assumem um papel muito importante na organização das funções psicológicas superiores. As funções mentais superiores (memória lógica, atenção voluntária, formação de conceitos, imaginação) são fortemente relacionadas às interações sociais (que são concretas) e nessas interações o papel das ferramentas culturais (instrumentos e signos) como mediadores é crucial. Isto quer dizer que a teoria de Vygotsky está bastante comprometida com o materialismo marxista, pois assume que as atividades mentais superiores são diretamente relacionadas a fenômenos sociais (concretos) e que as ferramentas culturais, também chamadas ferramentas mediacionais, são cruciais para a atividade humana (LIMA JR., OSTERMANN e REZENDE, 2014).

Este processo de evolução das funções psicológicas elementares em superiores somente é possível por meio da mediação, que ocorre com a utilização de signos (que significam algo) e instrumentos (utilizados para se fazer algo), os quais se interpõem entre o sujeito e o objeto de sua atividade (WERTSCH, 1993). Em outras palavras, as

funções psicológicas superiores são irredutíveis às funções psicológicas elementares⁶⁷, ou seja, as últimas não são versões embrionárias das primeiras. Logo, as funções psicológicas superiores não emergem naturalmente das elementares. Elas são resultado do pleno domínio que o indivíduo adquire das práticas sociais, o que envolve as ferramentas culturais (BAKHURST, 2007). É nesse aspecto que o desenvolvimento psicológico depende fortemente da interação social.

Desta forma, cabe-nos enfatizar, neste estudo, a caracterização da ação mediada, tal como é feito na subseção seguinte.

5.1.1 Conceitos-chave da teoria de Vygotsky explorados nesta pesquisa

De um modo geral, Vygotsky propõe que a conversão das relações sociais em funções psicológicas superiores ocorre através da mediação, a qual conduz a um processo de internalização, ou seja, a reconstrução interna de uma operação externa. Dito desta forma, o leitor mais descuidado pode acabar construindo a imagem de que os processos envolvidos são triviais e, como consequência, desenvolver uma compreensão muito superficial e, possivelmente, equivocada da teoria. Assim, para uma melhor compreensão da perspectiva teórica de Vygotsky, é preciso aprofundar as definições de mediação e de internalização, entretanto, será praticamente impossível tal compreensão se não levarmos em consideração as condições para que esses processos se desenvolvam a partir do conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP).

A compreensão da gênese das funções psicológicas superiores e, portanto, da mente humana na perspectiva da ação mediada deve ser empreendida a partir de três domínios: filogenético, sócio-histórico e ontogenético. No domínio filogenético, essa compreensão se torna possível a partir de uma análise darwinista, focada nas influências que a evolução da espécie humana têm sobre o comportamento (por exemplo, o uso de ferramentas pelos humanos e primatas) (VYGOTSKY e LURIA, 1996). A análise segundo o domínio sócio-histórico é centrada no papel desempenhado pela história social e cultural da humanidade sobre a formação dos 'comportamentos'. Isso diz respeito, por exemplo, à evolução das ferramentas mediadoras e ao seu uso em contextos diversos daqueles em que foram originalmente concebidas (por exemplo, a associação de pedras ou outros objetos para contar animais por um camponês em contraste com outros

⁶⁷ Este é um termo usado por Vygotsky para as funções de origem biológica como as sensações, percepções imediatas, emoções primitivas e memória indireta.

recursos semióticos, como a aritmética, dispensando este tipo de associação real para a realização de contagens) (LURIA, 1988). Por fim, a ontogênese tem como foco o estudo do desenvolvimento psicológico individual. O domínio ontogenético evidencia-se no trabalho de Vygotsky a partir do olhar sobre a evolução da espécie e a emergência das especificidades humanas (VYGOTSKY e LURIA, 1996).

A análise do desenvolvimento de uma função mental no domínio ontogenético, no qual aspectos sociais, culturais e biológicos são intervenientes por vezes pode ser acompanhada pelo estudo da microgênese, ou seja, o estudo da história de cada fenômeno psicológico. Um exemplo de análise microgenética é o caso do estudante que aprende a resolver problemas de 'cabeça', já citado no texto. Como essa capacidade se desenvolveu no estudante? Para responder a essa pergunta é preciso empreender uma análise microgenética e é isso que pode possibilitar que se compreenda a transformação das ações do indivíduo e a passagem do plano intersubjetivo para o intrasubjetivo. Outros exemplos em que se pode verificar a análise de Vygotsky do ponto de vista da ontogênese e da microgênese são os estudos sobre as relações entre pensamento e linguagem, atenção, fala egocêntrica, memória, desenvolvimento da imaginação e formação de conceitos (VYGOTSKY, 1994).

No que diz respeito à relação entre o pensamento e a linguagem, a análise microgenética permite compreender a transformação que ocorre desde o desenvolvimento independente da fala e do pensamento até seus usos sob formas mais elaboradas na comunicação humana. Nesse longo percurso, a fusão entre a fala e o pensamento dá origem a um todo chamado pensamento verbal que se manifesta, inicialmente, como uma espécie de fala privada e, posteriormente, converte-se em fala interna. A fala privada representa o processo de amadurecimento de uma função mental e tem papel determinante para a autorregulação da criança e obtenção de sucesso em tarefas de resolução de problemas. É, portanto, crucial para que as relações sociais possam se estabelecer.

Outro aspecto de suma importância a ser analisado é a forma como se dá a nossa relação com o mundo. Para isso, recorre-se ao conceito de atividade mediada, que carrega consigo a noção de instrumentos e signos, sem os quais seria impossível compreender tal conceito. Segundo Vygotsky (1994) a diferenciação entre instrumentos e signos pode ser feita da seguinte forma:

A função do instrumento é servir como um condutor da influência humana sobre

o objeto da atividade; ele é orientado externamente; deve necessariamente levar a mudanças nos objetos. Constitui um meio pelo qual a atividade humana é dirigida para o controle e domínio da natureza. O signo, por outro lado, não modifica em nada o objeto da operação psicológica. Constitui um meio da atividade interna dirigido para o controle do próprio indivíduo; o signo é orientado internamente (VYGOTSKY, 1994, p. 72-73).

Os instrumentos e os signos são empregados pelo homem como ferramentas de mediação entre ele e outras pessoas ou entre ele e o mundo. Nesse caso, os primeiros são de natureza material (medeiam a ação sobre os objetos) e os últimos, de ordem psicológica. Dentre os signos, a linguagem é de grande importância e isto pode ser facilmente percebido quando Vygotsky refere-se a esta como sendo o principal instrumento de mediação do conhecimento entre os seres humanos, uma vez que está relacionada diretamente com o desenvolvimento psicológico individual e coletivo (VYGOTSKY, 1998). Individual porque as informações intermediadas que alguém recebe são assimiladas e convertidas em uma forma de linguagem interna. Coletivo porque é pela linguagem que ocorre a socialização entre os indivíduos que fazem o intercâmbio de significados. É por meio da linguagem que as funções psicológicas superiores são socialmente formadas e podem ser culturalmente e historicamente compartilhadas.

Os instrumentos e signos podem, a partir da perspectiva psicológica, ser denominados de ferramentas culturais (ou mediacionais), as quais, por sua vez, são parte fundamental daquilo que se chama de ação mediada. Esta, por sua vez, pode ser vista como precursora do intercâmbio de signos, promovendo o crescimento intelectual e cultural dos indivíduos (VYGOTSKY, 1994). Nesta perspectiva, o conhecimento é visto não como o resultado de uma ação dos sujeitos sobre os objetos, mas de uma interação mediada por ferramentas culturais. Assim, não se tem acesso direto aos objetos de conhecimento, mas uma forma de acesso mediado, que são possibilitados pelos sistemas simbólicos dos quais dispomos.

Na análise de Vygotsky (1978), sobre a ‘tarefa das cores proibidas’ realizada por Leontiev, os cartões coloridos podem ser considerados signos mediadores somente para aquelas crianças que os utilizaram para alterar o ato de lembrar. No caso do IVMZ, a simulação na tela do computador, apresentando resultados das detecções, por si só, não é uma ferramenta mediadora. Assim como no caso das crianças que não ‘perceberam’ nenhuma utilidade para os cartões coloridos, os estudantes envolvidos na nossa pesquisa podem agir com indiferença à simulação, ou seja, não ‘reconhecerem’ nos

padrões de detecção nenhum significado que seja útil para a tarefa em questão. Isso recupera a noção de que os recursos semióticos adquirem significado por meio de seu uso por uma comunidade – no caso dos padrões de interferência, por exemplo, trata-se de um recurso pictórico que representa a variação da intensidade em um anteparo. Tal recurso por si tem apenas um significado potencial (por exemplo, para uma pessoa não letrada em Física), mas seu uso por anos em numerosas comunidades, incluindo as escolares, é que torna seu potencial comunicativo concreto e faz com que seja possível a comunicação de significado entre membros dessas comunidades. É quando se torna parte de uma cultura que os recursos semióticos podem se tornar poderosas ferramentas mediadoras (e, como já comentado, são aprendidas socialmente pelos indivíduos imersos nessa cultura). Da mesma forma, um relógio pode ser apenas um instrumento que se usa para verificar as horas, mas que também pode ser utilizado como um despertador para ajudar a lembrar de algum compromisso, por exemplo.

O caráter mediador da simulação com o IVMZ se deve à problematização que possibilita e o convite à ação que é oferecido aos indivíduos. O *software* é utilizado tanto como instrumento – controle sobre as diversas situações possíveis na simulação computacional – quanto signo, pois a mesma faz uso intensivo de linguagem não verbal, símbolos e imagem animada tridimensional do interferômetro, auxiliando na internalização dos conceitos. Além disso, seu uso colaborativo requer que a interação social desempenhe um importante papel, atuando como via para o intercâmbio de ideias mediadas pela fala, o que torna possível o compartilhamento de significados. A mediação e o caráter sógnico não estão nas ferramentas utilizadas, mas no uso que se faz delas. A relação dos estudantes com o mundo dos fenômenos físicos se dá através das ferramentas mediadoras, de modo a desencadear um processo não de passividade, mas de participação ativa na organização do conhecimento.

Para explicar o desenvolvimento psicológico, o qual pode ser caracterizado por uma evolução qualitativa na capacidade de realizar certas tarefas de um nível de complexidade para outro mais elevado, Vygotsky introduziu o conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP), definindo-a como a distância entre os níveis de desenvolvimento real e potencial, de modo que:

o nível de desenvolvimento real consiste no que o aprendiz consegue fazer sozinho, uma vez que já possui um conhecimento sólido, enquanto que o nível de desenvolvimento potencial consiste no grau de desenvolvimento que um indivíduo pode alcançar, o qual é verificado pela resolução de problemas sob a orientação de outra pessoa (VYGOTSKY, 1994, p. 112).

Wertsch (1984) argumenta que ‘orientação de outra pessoa’, ou ‘assistência de um parceiro mais capaz’, leva a imprecisões na definição de ZDP, pois tal assistência pode ocorrer de formas distintas, possibilitando que aprendizes, mesmo em condições diversas, tenham sucesso na resolução de um dado problema e isto permitiria afirmar que ambos estão no mesmo nível de desenvolvimento proximal. Chaiklin (2003) chama a atenção para a existência de uma concepção errônea de que é possível identificar de forma adequada a ZDP de um aprendiz para cada atividade e que isto pode facilitar sua aprendizagem. Da mesma forma, o nível potencial é interpretado como sendo uma propriedade do aprendiz, quando o correto seria reconhecê-lo como indicativo da presença de “certas funções de maturação, o que tem uma importância significativa para a ação interventiva” (CHAIKLIN, 2003, p. 43).

A ZDP está relacionada com desenvolvimento em si e não com tarefas específicas, de modo que o entendimento do significado que a assistência do parceiro mais capaz tem em relação à aprendizagem e ao desenvolvimento é a chave para a compreensão deste construto teórico.

A fim de promover um entendimento mais profundo da ZDP, Wertsch (1984) propõe uma interpretação baseada em três conceitos: definição de situação, intersubjetividade e mediação semiótica.

Definição de situação se refere à representação de um contexto espaço-temporal que é criado pelos indivíduos que nele atuam. No cenário envolvendo um adulto e uma criança, por exemplo, a representação dos eventos e objetos se dá de formas distintas, de modo que se pode dizer que apesar de atuarem de forma colaborativa, ambos não estão realizando a mesma tarefa. Para ilustrar isso, Wertsch (1984) usa o exemplo de um adulto e uma criança que são solicitados a montar, a partir de uma pilha de peças, um objeto que seja a cópia de um modelo preexistente. Apesar de executarem as mesmas ações, os motivos para as ações de ambos são bastante diferentes, ou seja, estão envolvidos padrões de ação diversos. Isso implica que para a criança assumir uma definição de situação como a do adulto é necessário uma reconstrução completa da definição de situação. Essa mudança é profunda e de natureza qualitativa, uma vez que não se trata apenas de um acréscimo de conhecimento, mas de uma mudança radical na forma de representar os objetos e os eventos envolvidos nesse cenário, ou seja, requer um novo padrão de ações.

A compreensão do nível proximal requer a análise dos indivíduos em uma situação de interação social, ou seja, para entender o funcionamento intrapsicológico é necessário analisar o plano interpsicológico. Para isso, Wertsch (1984) recorre à noção de intersubjetividade, considerando que esta existe quando em uma tarefa dois interlocutores compartilham, e sabem que compartilham, a mesma definição de situação. A intersubjetividade pode ocorrer em vários níveis: na forma de um simples acordo, como no caso da localização de objetos em um modelo (no exemplo do modelo-cópia citado anteriormente), ou até constituir um processo mais completo em que ambos os interlocutores têm representações idênticas para os objetos e eventos. Na maioria dos casos, entretanto, a intersubjetividade ocorre em um termo intermediário onde a definição de situação intersubjetiva é negociada. No caso da interação adulto-criança, essa negociação acaba por definir o nível potencial de desenvolvimento da criança. Dessa negociação pode resultar uma definição de situação interpsicológica cuja representação dos objetos e eventos se situa entre os pontos de vista inicialmente exibidos pelos interlocutores, ou seja, a nova definição de situação é diferente daquela existente anteriormente no plano intrapsicológico. A negociação da definição de situação intersubjetiva somente se torna possível a partir do que Wertsch (1984) chama de mediação semiótica, a qual pode ocorrer pelo uso da linguagem, por exemplo.

As várias possibilidades de negociação podem aparecer sob a forma de enunciados variados, que podem ser diretivos (um interlocutor atribui tarefas ao outro com base em um padrão de ações condizente com sua definição de situação) ou mais 'consultivos' (um interlocutor procura fornecer meios para que o outro modifique sua representação dos objetos e padrões de ação). Este segundo caso indica um tipo de flexibilidade semiótica que soa como um convite ao interlocutor para promover uma redefinição de situação a partir da representação dos objetos e eventos num novo nível de intersubjetividade.

Para explicar essa mudança qualitativa que caracteriza o processo de desenvolvimento, Vygotsky usa a noção de situação social do desenvolvimento, ou seja, a relação da criança com o ambiente. É nessa relação que surge a contradição entre as capacidades da criança num dado momento e as exigências do ambiente, exigindo envolvimento em diferentes ações, podendo levar à formação de novas funções psicológicas necessárias àquela ação ou ao amadurecimento das funções que já existem. Isso reforça a ideia de que o aprendizado precede o desenvolvimento e de que

os períodos de desenvolvimento são histórica e materialmente construídos, ou seja, as funções psicológicas se desenvolvem ao longo da história das práticas humanas (filogênese⁶⁸) “e são consequência de tarefas e interações com os outros” (CHAIKLIN, 2003, p. 48).

Estas tarefas e interações devem estar em sintonia com a ZDP, cuja análise deve levar em consideração:

(a) [a] criança como um todo, (b) a estrutura interna (ou seja, as relações entre as funções psicológicas), (c) o desenvolvimento como uma mudança qualitativa nas relações estruturais, (d) provocada por ações da criança em situação social de desenvolvimento (refletindo o que a criança percebe e em que está interessada), onde (e) cada período tem uma atividade/contradição principal que organiza as ações da criança (dentro do qual os interesses subjetivos estão operando) através do qual novas funções se desenvolvem (CHAIKLIN, 2003, p. 50).

A ZDP tem dois componentes, um objetivo e um subjetivo, pois consiste em uma forma de se referir tanto às funções psicológicas que estão se desenvolvendo, ontogeneticamente, para determinada idade quanto ao estado presente de desenvolvimento da criança comparado às funções que esta deve realizar, considerando condições ideais. Segundo Vygotsky, a ZDP permite acessar as conexões dinâmico-causais e genéticas, que são determinantes no desenvolvimento mental e para compreender a sua existência é preciso compreender um conceito central da análise proposta, a *imitação*.

O termo ‘imitação’ em Vygotsky, segundo Chaiklin (2003, p. 52), se refere “a situações em que a criança é capaz de se envolver em interação com outros mais competentes em torno de tarefas específicas que [ela], de outra forma, não seria capaz de realizar sozinha, por causa da presença das funções psicológicas de maturação”.

Para que a imitação possa ocorrer, na resolução de um problema, por exemplo, é imprescindível que exista algum entendimento acerca das relações estruturais envolvidas.

Se eu não sou capaz de jogar xadrez, não serei capaz de jogar uma partida mesmo se um mestre de xadrez me mostrar como.
[...] Para imitar, deve haver alguma possibilidade de movimento do que eu posso para o que eu não posso fazer (VYGOTSKY, 1987, p. 209).

⁶⁸ Para Vygotsky, o ambiente biológico se transforma de modo gradual em ambiente cultural, e isso faz com que a atividade humana adquira um caráter de atividade mediada, social e instrumentalmente (DEL RÍO e ÁLVAREZ, 2007).

Embora as funções de maturação, para uma dada criança, estejam minimamente desenvolvidas, seja por intermédio da cultura ou da sociedade, isso não significa que ela será capaz de realizar alguma tarefa (que esteja além de sua idade mental) de forma independente ou de imitar, caso seja assistida. A imitação somente será possível em um cenário de colaboração se funções mentais apropriadas estiverem presentes e, para que a criança logre êxito, é preciso que entenda o significado dessa colaboração.

Quando é apresentado à criança um problema que não consegue resolver sozinha e ela recebe alguma assistência, esse trabalho colaborativo também permite avaliar as funções psicológicas de maturação, uma vez que a ocorrência ou não da imitação é um indicador importante em relação ao estado dessas funções (CHAIKLIN, 2003). As funções de maturação não têm origem na interação, mas é a interação que oferece as condições para a identificação da existência dessas funções e a extensão de seu desenvolvimento. A negociação e a imitação são recursos muito importantes no processo de internalização que, segundo Wertsch (1998), pode ser interpretada de duas formas: internalização como domínio e internalização como apropriação.

Domínio, na concepção de Wertsch, diz respeito a saber utilizar uma ferramenta cultural com facilidade, enfatizando a compreensão dos significados dos signos, ou o 'saber como' que, no caso da linguagem, corresponderia aos padrões linguísticos e os princípios que regem o funcionamento de uma língua. Por exemplo, as línguas indígenas, embora sejam apenas faladas, têm seus próprios princípios de funcionamento que são socioculturalmente definidos e o seu domínio implicaria reconhecer e saber utilizar as suas regras com segurança. A noção de internalização pode, segundo Wertsch, conduzir à compreensão da ação mediada como ocorrendo, inicialmente, em um plano externo e, posteriormente, em um plano interno, de modo que tal ação desaparece quando essa conversão ocorre. Exemplos como o do camponês que associa uma pedra para cada animal ou o caso da criança que utiliza os dedos para contar reforçam essa noção de internalização. O mesmo ocorre com o ato de apontar, que é uma forma de ação mediada no plano externo até que a criança deixa de apontar os objetos e os solicita verbalizando seu desejo. Esse 'saber como' torna-se possível quando a criança começa a aprender as formas mais básicas da semiose da língua (processo que é influenciado diretamente pelo contexto sociocultural e pela interação com os seus pares), associando palavras aos objetos e, conforme este domínio evolui, consegue formular mais claramente seus desejos. Essa noção de internalização pode, entretanto, ser enganosa em alguns casos

por induzir à busca de “conceitos internos, regras e outras entidades mentais” (WERTSCH, 1998, p. 48).

A noção de domínio é mais abrangente por dar conta também de formas de ação mediada que ocorrem no plano externo, como no caso da multiplicação em que a criança organiza os fatores em uma disposição vertical, como ensinado na escola. A mediação se dá no plano externo e

é pouco provável que a operação como um todo seja completamente internalizada. Dependendo dos números envolvidos, tal operação requer uma ferramenta cultural que “realize parte do pensamento”. Assim, a metáfora da internalização resulta demasiadamente forte porque implica algo que frequentemente não ocorre (PEREIRA e OSTERMANN, 2012a, p. 32).

A esse respeito, os autores também citam como exemplo as simulações computacionais, uma forma de ação mediada que ocorre no plano externo e que é de particular interesse para a pesquisa realizada em função da utilização do IVMZ como ferramenta mediadora.

A internalização, quando interpretada como apropriação das ferramentas culturais, implica a concepção de ‘tornar próprio’, ‘tornar seu’, sendo, portanto, mais abrangente que a noção de domínio sobre essas ferramentas. Para desenvolver esta interpretação, Wertsch (1998) parte da apropriação da língua, conforme proposto por Bakhtin (1981), segundo o qual as palavras de outros tornam-se nossas quando as povoamos com acentos e intenções discursivas próprios (ou seja, com nossas vozes), concedendo uma nova perspectiva e ajustando-as às nossas ações. Nesse sentido, a apropriação implica uma íntima relação entre a ferramenta cultural e aquele que dela faz uso, algo que, quando ocorre, se reflete na utilização dos sistemas de signos nos mais diversos contextos e com propósitos variados. Esse processo de recriar, ou remodelar um sistema de signos é complexo e não ocorre prontamente, o que implica que a apropriação se dá a longo prazo.

Uma vez que as ferramentas mediadoras são aprimoradas, os sistemas de signos passam a desempenhar um papel ainda mais importante no sentido de proporcionar domínio e apropriação que são, portanto, processos governados pelo desenvolvimento histórico da sociedade. Retomando o exemplo da ação de contar, observa-se que esta depende fortemente do contexto sociocultural e passa por uma transformação qualitativa na forma como os sistemas de signos são utilizados, desde a associação de quantidades perceptíveis, concretas, para cada objeto a ser contado até a contagem usando

quantidades abstratas. Isso ilustra um princípio geral de desenvolvimento, que Wertsch chama de princípio da descontextualização de instrumentos de mediação “e consiste no processo pelo qual o significado dos signos torna-se cada vez menos dependente do contexto espaço-temporal único em que são utilizados” (WERTSCH, 1985, p. 33). Nesse exemplo, a descontextualização se reflete na utilização de um sistema em que a representação de uma quantidade independe de qualquer contexto real. Usa-se 1, 2, 3,..., mas sem especificar o que se está contando, ou seja, essa contagem não está necessariamente vinculada a nenhum objeto concreto.

A capacidade de um indivíduo em utilizar os instrumentos de mediação em contextos distintos, ou seja, descontextualizar, caracteriza a apropriação desses instrumentos. Imediatamente conclui-se que o domínio sobre uma ferramenta cultural por parte do indivíduo não garante a apropriação dessas. Isso é muito importante quando se pensa na análise dos indivíduos em sala de aula, em situação de interação com seus pares e com instrumentos mediadores.

É em grande parte pelo domínio e apropriação de sistemas de signos, processos construídos socialmente, que ocorre o desenvolvimento psicológico. Como exemplo, temos a linguagem, que é um complexo sistema de signos criados pela humanidade ao longo da sua história e que modificam e influenciam seu desenvolvimento social e cultural. Assim, conforme se aprendem novos instrumentos e signos, maior é a gama de atividades que o sujeito pode aprender e esse é um dos fatores que modificam o mundo que o cerca.

No que se refere à sala de aula, a internalização dessas ferramentas requer um complexo processo de interação com o contexto sociocultural. Conforme descrito anteriormente, essa internalização não é simplesmente transferir uma atividade tipicamente social como a mediação para um plano intrapsicológico, mas de fato adquirir domínio e apropriar-se das ferramentas mediadoras (BAKHURST, 2007) num contexto sociocultural⁶⁹ e fazer uso das mesmas em situações particulares (por exemplo, em situações didáticas orientadas para o aprendizado de conceitos científicos), ou seja, descontextualizar. O desenvolvimento psicológico, portanto, (e, assim, a aprendizagem) para Vygotsky não pode se estabelecer sem que haja uma complexa interação entre o

⁶⁹ Segundo Bakhurst (2007, p. 73), “a assimilação da cultura não é uma simples absorção de alguma coleção fixa e estável de fatos, mas a interiorização das tradições de pensamento e de investigação que são essencialmente abertas à reflexão, contestação e desenvolvimento”.

indivíduo e o contexto sociocultural. Este processo de interação ocorre com a presença do que Vygotsky chama de parceiro mais capaz (a grosso modo, são pessoas mais aptas que podem auxiliar o aluno a realizar atividades mais complexas do que aquelas que ele poderia realizar se trabalhasse sozinho – o professor é um clássico exemplo de parceiro mais capaz e tem enorme importância na teoria de Vygotsky).

Nesse cenário, a ZDP tem um papel fundamental, uma vez que se refere àquelas funções psicológicas de maturação que têm importância para o período de desenvolvimento subsequente e possibilitam atuar em situações de colaboração, o que não seria possível de forma independente. Conforme escrevem Del Río e Álvarez (2007) as funções psicológicas

nem sempre são projetadas nas culturas humanas para operar, em seu estado mais desenvolvido, de forma totalmente individualizada; em vez disso, algumas funções psicológicas são concebidas para operar sempre de forma compartilhada (DEL RÍO e ÁLVAREZ, 2007, p. 281).

Assim, o trabalho colaborativo permite avaliar a ZDP em função da sua potencialidade para promover a ocorrência da imitação que “é um dos caminhos básicos para o desenvolvimento cultural [e intelectual] da criança” (VYGOTSKY, 1997, p. 95). A avaliação das funções psicológicas de maturação é possível pelo fato de que a imitação permitirá, conforme já escrevemos, avaliar se essas conseguem ou não dar suporte ao desempenho individual da criança.

Nessa avaliação, conforme propõe Chaiklin (2003), o ‘tamanho’ da ZDP estará associado ao quanto uma criança consegue aproveitar o trabalho colaborativo para obter um desempenho que vá além daquilo que é esperado para sua idade. Para Vygotsky, o bom ensino é aquele que desencadeia o uso de funções que ainda não estão completamente maduras no indivíduo, ou seja, é aquele que se posiciona à frente do desenvolvimento. É nesse contexto que surge a ZDP e pode-se dizer que esse conceito é central quando o foco é direcionado à aprendizagem, ou seja, qualquer situação de ensino deve ser planejada levando-a em consideração.

A ZDP claramente está relacionada ao contexto sócio-histórico-cultural do indivíduo, de modo que o contexto onde o mesmo se insere é um fator determinante para a forma como encara a tarefa de realizar uma classe de atividades ou estudar conceitos de determinada área. A ZDP tem especial importância na teoria de Vygotsky, pois é também por essa via que os processos anteriormente vivenciados socialmente em

interações interpessoais (no plano intermental ou interpsicológico) são internalizados. Essa reelaboração se dá pela ação efetiva de parceiros mais experientes no uso das ferramentas mediacionais características de uma determinada cultura.

O nível de desenvolvimento real caracteriza o desenvolvimento mental retrospectivamente, enquanto que a ZDP caracteriza-o prospectivamente (VYGOTSKY, 1994), pois enquanto o primeiro pode fornecer um indicador do que o indivíduo é capaz de realizar sozinho, o segundo fornece um indicativo do que esse mesmo indivíduo pode vir a realizar sozinho no futuro. Por isso, o conceito de ZDP é tão importante em situações de ensino, já que a aprendizagem e, conseqüentemente, o desenvolvimento psicológico se relacionam fundamentalmente por essa via. Essa relação tem conseqüências diretas na aprendizagem, pois, para Vygotsky, o aprendizado potencializa o desenvolvimento psicológico.

O *software* IVMZ, como ferramenta cultural, exige que o professor-pesquisador adote estratégias que levem em conta o estabelecimento de uma ZDP nos estudantes e que, com isso, sejam capazes de promover a aprendizagem de conceitos contraintuitivos da FQ. Neste caso, o professor, visto como um parceiro mais capaz, é aquele que domina os conceitos fundamentais a serem ensinados e que também domina e sabe como empregar recursos linguísticos adequados e outros recursos mediadores no contexto da sala de aula.

Na pesquisa aqui apresentada, a interação em sala de aula originou-se a partir de atividades mediadas pelo IVMZ e pelo uso de roteiros exploratórios preparados para essas atividades. Como resultados dessa interação, foram registrados diálogos entre os estudantes e o professor, além de respostas aos roteiros exploratórios. Na busca por alternativas que possibilitem analisar detalhadamente o processo de mediação promovido em sala de aula e as estratégias adotadas pelos alunos para compreenderem os conceitos de FQ estudados, recorreu-se à filosofia translinguística de Bakhtin, que é explorada na próxima seção.

5.2 A filosofia translinguística de Bakhtin: aspectos gerais

Mikhail Mikhailovich Bakhtin (1895-1975), assim como Vygotsky, vivenciou a efervescência de uma Rússia na revolução e, após esta, um período caracterizado pela intensa reflexão e produção em diversas áreas, como a Literatura, Artes e a Filosofia.

Este influente, mas até recentemente esquecido, teórico do século XX, conforme apontam Clark e Holquist (2008), passou quase que toda a sua existência sem grandes momentos de destaque no que se refere à divulgação de seus trabalhos, de modo que suas produções de maior reconhecimento⁷⁰ são *'Problemas da poética em Dostoiévski'*, de 1929 e *'Rabelais e seu mundo'*, de 1940⁷¹. Somente na década de 1960 é que se pode dizer que Bakhtin foi realmente descoberto pelo campo da Literatura, exercendo hoje, e de forma crescente, influência em diversas áreas.

Entre os anos de 1920 e 1930, formou-se o Círculo de Bakhtin, um grupo de estudiosos soviéticos com interesses filosóficos afins e que se reuniam sob a liderança de Bakhtin para discutir suas ideias. Participaram deste círculo, entre outros, Valentin Volochinov e Pavel Medvedev, os quais assinam textos produzidos entre 1924 e 1929, conhecidos como textos disputados⁷² (*idem*).

A essência da proposta de Bakhtin, Volochinov e Medvedev não era postular regras rígidas na forma de uma teoria analítica fechada. Ao contrário disso,

[...] o conjunto das obras do Círculo motivou o nascimento de uma análise/teoria dialógica do discurso, perspectivas cujas influências e consequências são visíveis nos estudos linguísticos e literários e, também, nas Ciências Humanas de maneira geral (BRAIT, 2010, p. 9-10).

A teoria de Bakhtin exerce hoje grande influência sobre os estudos da linguagem, não se restringindo à sua dimensão comunicativa, mas buscando compreender como estamos permanentemente constituídos em termos de linguagens e de que forma isso possibilita significar o mundo ao nosso redor e a nós mesmos. Podemos considerar como ponto de partida da translinguística de Bakhtin o vínculo estabelecido entre a atividade humana e a utilização da linguagem. É na linguagem e pela linguagem que o ser humano se constitui. Fazemos a leitura do mundo e com ele interagimos num processo de busca pela socialização, onde a linguagem, enquanto produto da humanidade, é fundamental para garantir a plena construção de saberes que permitem o aperfeiçoamento enquanto 'ser', enquanto sujeito imerso em um complexo sistema de signos. A linguagem não pode

⁷⁰ Na obra sobre Dostoiévski, Bakhtin introduziu a noção de polifonia, destacando a existência de diversas vozes ideológicas e, em relação a Rabelais, apresentou a carnavalização como forma de cultura popular.

⁷¹ Também de autoria de Bakhtin, exercem grande influência *'Discurso no romance'* e *'O problema dos gêneros do discurso'* traduzidas, respectivamente, em 1934 e 1953.

⁷² Estes textos ainda são alvo de debates quanto a sua real autoria, se por Bakhtin propriamente ou por outros participantes do círculo. Os mais conhecidos são *'Freudismo: um esboço crítico'* (1927) e *'Marxismo e Filosofia da linguagem'* (1928), assinados por Volochinov e *'O método formal no estudo da literatura'*, assinado por Medvedev.

ser compreendida como sistema abstrato de formas e regras linguísticas, muito menos como enunciação monológica realizada isoladamente, mas como fenômeno social de interação verbal que é expresso através de enunciados. Assim, fica claro que, para Bakhtin, nem a linguagem nem o indivíduo se constituem isoladamente, mas constituem um todo que evolui historicamente, via interação homem-língua-mundo.

Bakhtin coloca, em primeiro lugar, a questão dos dados reais e materiais para compreender o fenômeno da linguagem e, por isso, sua análise tem como foco a fala na sociedade, o enunciado enquanto produto social, apesar deste ter seus componentes individuais. A língua é vista como um fato social, cuja existência está fundamentada nas necessidades da comunicação. A fala é considerada como estando intimamente ligada às condições da comunicação que, por sua vez, estão sempre ligadas às estruturas sociais. Dado o contexto da União Soviética na época, percebe-se a forma com que Bakhtin vê a linguagem: a sociedade estava em constante transformação e, portanto, a relação homem-mundo também deveria ser dinâmica, de modo que a linguagem não poderia se submeter a formas cristalizadas, imutáveis. Assim, a palavra é vista como um fenômeno ideológico que representa a dinâmica social, reproduzindo as relações sociais e materiais, constituindo-se numa espécie de 'arena' onde se confrontam comunidades semióticas e valores sociais contraditórios, de modo que os conflitos da língua refletem os conflitos de classe no interior do sistema e as relações intersubjetivas num dado contexto social (BAKHTIN, 2009).

A língua não é pensada como um sistema abstrato, mas como atividade humana, de modo que a linguagem é um produto vivo que resulta da interação social, das condições materiais e históricas de cada tempo, ou seja, o uso da linguagem não se dá num completo vazio. As práticas sociais carregam consigo valores contraditórios e a forma como se opera com os mesmos está intimamente ligada às alternativas ideológicas presentes em um dado momento sócio-histórico. O valor impresso ao discurso, seja falado ou escrito, no diálogo com o mundo implica uma (re)construção da identidade dos indivíduos e visa a transformação ou a manutenção do sistema social vigente. Assim, a abordagem sócio-histórica que Bakhtin defende para a linguagem busca explicar de forma crítica os processos de produção social das normas e usos da língua, que têm origem nas necessidades da sociedade em determinado momento.

Como produto da interação social, a propriedade mais significativa da língua é o seu caráter dialógico, que é característico de todo processo discursivo.

Segundo Bakhtin (1997),

o objeto do discurso de um locutor, seja ele qual for, não é objeto do discurso pela primeira vez neste enunciado, e este locutor não é o primeiro a falar dele. O objeto, por assim dizer, já foi falado, controvertido, esclarecido e julgado de diversas maneiras, é o lugar onde se cruzam, se encontram e se separam diferentes pontos de vista, visões de mundo, tendências. Um locutor não é um Adão bíblico (...) (BAKHTIN, 1997, p. 320).

O dialogismo é um conceito central na teoria bakhtiniana e representa as relações discursivas entre o homem e o mundo, entre o sujeito e o objeto do conhecimento, funcionando como a fonte da produção de sentidos no discurso. Bakhtin quer dizer que o sujeito não é a única fonte das palavras que diz, pois sua constituição ocorre através de um processo dinâmico, segundo uma perspectiva histórico-social. As palavras “são tecidas a partir de uma multidão de fios ideológicos e servem de trama a todas as relações sociais em todos os domínios [...] a palavra será sempre o indicador mais sensível de todas as transformações sociais” (BAKHTIN, 2009, p. 42).

Do ponto de vista do dialogismo, a linguagem, segundo Di Fanti (2003),

[...] constitui-se como uma reação-resposta a algo em uma dada interação e manifesta as relações do locutor com os enunciados do outro. Por isso, temos de considerar que o outro, no movimento dialógico, não é somente o interlocutor imediato ou virtual. [...] O outro projeta-se a partir de discursos variados (passados, atuais, presumidos). São as outras vozes discursivas – posições sociais, opiniões – que vêm habitar de diferentes formas o discurso em construção (DI FANTI, 2003, p. 98).

Nesse processo de interação, de negociação de sentidos, a presença do eu e do outro, a alteridade que constitui a linguagem, é a marca da teoria da enunciação, de modo que “eu não posso me tornar eu mesmo sem um outro” (BAKHTIN, 1997, p. 287), ou seja, o indivíduo se constitui na relação dialógica com o outro e isso o caracteriza como sendo um sujeito social.

Essa relação dinâmica que constitui a linguagem faz com que sejam empregados diferentes gêneros discursivos, os quais estão vinculados a determinados contextos socioculturais. Os gêneros de discurso não são a própria linguagem, diferente disso, são formas relativamente estáveis de enunciados, que dão forma à utilização da linguagem e são caracterizados em função das situações típicas de comunicação verbal (BAKHTIN, 1997). Todo enunciado carrega consigo um gênero discursivo. Como exemplos de gêneros discursivos temos os textos jornalísticos, artigos de divulgação científica, uma conversa informal entre amigos, a sentença em um tribunal, uma carta, entre outros.

Considerando a perspectiva bakhtiniana, aqui brevemente apresentada, conforme propõe Wertsch a pergunta ‘quem está falando?’ teria como resposta padrão ‘pelo menos duas vozes’, de modo que nesta perspectiva “a explicação das linguagens sociais e dos gêneros discursivos significa que, além da consciência falante concreta que produz o enunciado único, também deve estar envolvido um tipo de voz” (WERTSCH, 1993, p. 83).

Nas seções seguintes, serão explicados conceitos bakhtinianos em torno dos quais a análise dos dados obtidos nesta pesquisa focalizar-se-á.

5.2.1 Conceitos-chave da translinguística bakhtiniana para esta pesquisa

Considerando a forma como foi conduzida a intervenção didática e coleta dos dados, conceitos como enunciado, voz e contrapalavra (será definido mais adiante) assumem um papel muito importante. A forma como se dá a comunicação verbal, como já citado, é um processo dialógico no qual há a presença de pelo menos duas vozes: daquele que fala e aquele a quem se dirige a fala. Na cadeia de enunciados de uma interação discursiva ou mesmo de um texto, mesmo não explicitamente, outras vozes podem moldar os discursos. Isto é, os discursos incorporam vozes que podem não ser aquelas que diretamente participam do processo enunciativo, mas vozes oriundas do contexto sociocultural no qual os agentes que participam diretamente do processo enunciativo estão inseridos. Sendo assim, essas vozes podem ter origem em diferentes espaços e épocas em que os discursos são construídos e têm papel importante nessa construção (isso será detalhado mais adiante).

Para complementar algumas das ideias de Vygotsky e por enfatizar esse aspecto sociocultural na constituição do indivíduo, Wertsch (1993) propõe que alguns conceitos utilizados por Bakhtin como enunciado, voz, linguagem social e diálogo são fundamentais. Dessa forma, as perspectivas vygotskyana e bakhtiniana consideram um equívoco conceber os instrumentos mediadores como isolados da ação.

Bakhtin (1997) destaca a importância da fala na constituição da consciência que, sendo um processo coletivo, é permeado pela existência dos signos. Há dois aspectos a se considerar na palavra. A fala procede de alguém e se dirige a alguém, sendo o produto da interação entre locutor e ouvinte. Esse dialogismo, o qual está entre os principais pilares do pensamento bakhtiniano, significa que, quando uma fala é dirigida a alguém, temos um enunciado completo formado por esta fala, que funciona como uma

espécie de elo na comunicação verbal. Isso deixa claro que um enunciado não é algo isolado, indiferente de outros enunciados.

De acordo com Bakhtin ao produzir um enunciado invoca-se um gênero discursivo, ou seja, uma forma de construção típica e relativamente estável, definida pelo contexto em que se encontra o falante. Isto significa que a forma do enunciado depende do contexto social e cultural no qual ele é produzido, ou seja, depende do destinatário, da finalidade discursiva e do tema. A perspectiva do enunciador é a perspectiva da atividade em que ele está inserido e o horizonte do seu discurso está no receptor, de modo que o estilo de linguagem a ser empregado é moldado em função daquele a quem se dirige o discurso. A aproximação de Bakhtin aos sistemas de significação procura destacar a noção de que os enunciados e os seus significados estão situados em um contexto sociocultural, pois a produção de um enunciado implica o uso de uma linguagem social e de um gênero discursivo, que são determinados pelas condições específicas de cada esfera de atividade.

Para ilustrar o parágrafo anterior, tomemos como exemplo as falas de um professor de Física. Ao ministrar uma aula a seus alunos, irá empregar um estilo de linguagem e abordar conceitos científicos de forma diferente do que faria se estivesse em um momento de descontração com os amigos, ou em uma convenção de físicos, onde usaria uma linguagem mais técnica e com maior rigor científico. Desta forma, os recursos linguísticos empregados remetem a diferentes gêneros discursivos, determinados pelo contexto onde se insere aquele que enuncia, ou seja, os enunciados são organizados de acordo com o meio no qual o indivíduo está inserido e com as relações dialógicas estabelecidas. Estes são concebidos como formas de organizar as ações comunicativa e mental (BAKHTIN, 1997). Ainda, os enunciados não são neutros nem indiferentes uns aos outros e nem autossuficientes; conhecem-se uns aos outros, refletem-se mutuamente de modo que o locutor não é o primeiro a falar sobre algo (nesse contexto, o conceito de vozes ganha bastante importância).

Todo enunciado, de certa forma, responde a enunciados de outros e desperta uma compreensão responsiva, ou seja, a preparação para uma resposta. A forma com que se dá esta compreensão responsiva a qual pode aparecer na forma de um gesto, do cumprimento de uma ordem ou de uma resposta falada, depende do gênero discursivo empregado na interação comunicativa. É por trás do 'querer-dizer', isto é, das intenções discursivas daquele que enuncia que aparecem os diferentes gêneros discursivos.

Ao responder um enunciado evocamos os enunciados de outros e do próprio enunciador, de modo a reproduzi-los no processo de comunicação discursiva. Isto caracteriza o aparecimento, em nossas palavras, daquilo que os teóricos da linguagem chamam de 'vozes'. Não há como se separar voz e enunciado, uma vez que "um enunciado oral ou escrito se expressa sempre desde um ponto de vista (uma voz)" (WERTSCH, 1993, p. 71). A esse respeito, o conceito de voz é descrito por Bakhtin como resultado da interação nas perspectivas sociais e individuais, de modo que as 'nossas' palavras são tomadas emprestadas de outros e carregadas de sentidos ideológicos.

Desta forma, considerando a perspectiva bakhtiniana, um enunciado nunca será neutro e também não estará associado a apenas uma voz mas, pelo menos, a duas vozes. A esse processo, no qual não é apenas uma voz a responsável pela criação de um enunciado, mas que na verdade as palavras são em parte de outro, Wertsch (1993) chama de interanimação. Tomando como exemplo o processo de ensino, podemos encontrar no enunciado do aluno a voz do professor, dos livros didáticos, da comunidade e/ou instituição na qual o aluno está inserido ou de outros colegas. Esta multiplicidade de vozes que perpassam o discurso evidencia que o mesmo nunca está rigorosamente restrito ao contexto no qual ele foi elaborado. O discurso carrega consigo relações, às vezes quase imperceptíveis, com ideologias, normas institucionais, culturais, enfim, aspectos que podem estar afastados, espacial ou temporalmente, do contexto em que o discurso se desenvolve.

Outro aspecto, não menos importante, a ser considerado é que a compreensão de um enunciado fica evidente quando um indivíduo consegue reelaborá-lo com suas próprias palavras, entonações, enfim, empregando seus próprios recursos linguísticos. Nos termos usados por Bakhtin, "a cada palavra da enunciação que estamos em processo de compreender, fazemos corresponder uma série de palavras nossas, formando uma réplica [...] quanto mais numerosas e substanciais forem, mais profunda e real é a nossa compreensão" (BAKHTIN, 2009, p. 137). Essa associação de contrapalavras (ou palavras alternativas que compõem o repertório do ouvinte) ao enunciado permite que cada indivíduo ressignifique o discurso produzindo novos sentidos e evidenciando uma carga sociocultural própria, determinada, por exemplo, por suas crenças ou ideologias. A variedade de contrapalavras associadas aos enunciados de outro é uma via importante para se investigar os significados que estão em jogo e as

vozes discursivas intervenientes no processo de domínio ou apropriação das ferramentas culturais envolvidas.

Com base nos conceitos já abordados, nas próximas seções desse capítulo serão aprofundados conceitos essenciais para as análises realizadas.

5.2.2 Enunciado

O enunciado tem seu estilo (recursos lexicais, fraseológicos e gramaticais da língua) e construção composicional (estrutura do enunciado) definidos por quatro características que lhe são particulares: a alternância, o acabamento, a sua relação com o locutor e a sua expressividade.

Os enunciados que serão aqui analisados se desenvolvem no contexto mais imediato de uma situação didática em sala de aula. O objetivo é estruturar a análise dos mesmos procurando elementos que evidenciem aprendizado dos conceitos físicos envolvidos. Para isso, é importante estruturar a análise seguindo critérios que permitam avaliar como esses enunciados são moldados nesse contexto, identificando as diversas vozes que participam de sua construção.

Sendo o enunciado a unidade fundamental do discurso, consideramos que este coincide com o turno de fala, terminando pela transferência da palavra a outro. Tem-se assim a primeira característica que define o estilo e a composição do enunciado, e o delimita. Embora a extensão e a natureza semiótica dos enunciados sejam variáveis, Bakhtin propõe que estes sempre possuem “características estruturais que lhe são comuns e, acima de tudo, fronteiras claramente delimitadas” (BAKHTIN, 1997, p. 293).

A segunda característica do enunciado, que está intimamente ligada à primeira, é o seu acabamento, ou conclusibilidade. Este acabamento responde a dois critérios, a posição responsiva e a totalidade do enunciado, e refere-se ao fato de o locutor ter esgotado o seu turno de fala, de modo que é como se o ‘outro’ escutasse um ‘ok, agora é sua vez’. Isso incita o ouvinte a replicar, mesmo que seja com uma simples sílaba, aparentemente fragmentada, ou seja, o ouvinte adota uma posição responsiva. A totalidade do enunciado é que proporciona ao ‘outro’ a possibilidade de agir de modo responsivo e é obtida a partir de três fatores: tratamento exaustivo do objeto, o querer-dizer do locutor e o gênero discursivo empregado. O tratamento exaustivo refere-se ao fato de os enunciados exigirem atitudes responsivas por parte do ‘outro’ que podem ser abrangentes ou padronizadas (permitindo pouca criatividade). Os enunciados típicos da

atividade científica, por exemplo, tratam com objetos inesgotáveis e apresentam um mínimo de acabamento; por outro lado as perguntas factuais da vida cotidiana e as ordens recebidas na vida profissional ou no ambiente militar são enunciados perfeitamente acabados (BAKHTIN, 1997). A totalidade do enunciado também é determinada pelas intenções do locutor, ou pelo seu querer-dizer. Este aspecto está intimamente ligado ao anterior, determinando-o, assim como determina o terceiro aspecto, o gênero discursivo empregado, que corresponde à forma com que os enunciados são estruturados. O querer-dizer do locutor o faz escolher um gênero discursivo, o que implica o tratamento exaustivo do objeto e, portanto, já permite prever a finalização do enunciado, dando ao 'outro' a noção de acabamento. Todos estes três aspectos, tanto combinados como de forma isolada, indicam o acabamento do enunciado e, por sua vez, exigem um posicionamento responsivo do 'outro'.

A terceira característica do enunciado, ou seja, a sua relação com o próprio falante, emerge do fato que a escolha dos recursos linguísticos está diretamente relacionada tanto às ideias quanto aos juízos de valor atribuídos pelo falante ao conteúdo do objeto e ao sentido do enunciado. Decorre que estas relações afetam tanto o estilo do enunciado quanto a sua construção composicional. Nesse ponto, a quarta característica do enunciado, a expressividade do locutor frente ao objeto de seu enunciado, é variável conforme as esferas da comunicação verbal, de modo que é impossível existir um enunciado totalmente neutro. Em relação a esta característica, é interessante destacar o que Bakhtin chama de 'entonação expressiva', a qual é

[...] um dos recursos para expressar a relação emotivo-valorativa do locutor com o objeto do seu discurso. [...] Se uma palavra isolada é proferida com uma entonação expressiva, já não é uma palavra, mas um enunciado completo, realizado por uma única palavra... [...] a entonação expressiva não pertence à palavra, mas ao enunciado (BAKHTIN, 1997, p. 309-310).

A entonação expressiva é uma forma de expressar relações valorativas do locutor em relação ao objeto de seu discurso e, assim como a seleção das palavras e a disposição das mesmas num enunciado, atua de forma a organizá-lo em torno de uma espécie de 'timbre', que é determinado pelo público a quem se dirige o enunciado.

5.2.3 Contexto extraverbal

O enunciado, na concepção bakhtiniana, se constitui não só de palavras, contrapalavras, gêneros e vozes discursivas, mas também de um contexto extraverbal,

que identifica o caráter social da linguagem, de modo que este pode ser compreendido como o contexto ou o momento sócio-histórico-cultural em que os interlocutores se situam.

Volochinov (1976) propôs três fatores que permitem compreender o enunciado a partir da sua condição extraverbal, sendo:

a) o horizonte espacial compartilhado pelos interlocutores: refere-se à composição do universo interativo, incluindo desde o espaço físico onde se localizam os interlocutores até o contexto sociocultural onde ocorre o discurso.

b) o conhecimento e a compreensão comum da situação, ou intersubjetividade, por parte dos interlocutores: trata-se do repertório sociocultural compartilhado entre os interlocutores, ou seja, um conhecimento comum que lhes favorecerá a compreensão dos acontecimentos no seu entorno.

c) a avaliação comum da situação: refere-se aos aspectos que possibilitarão ao interlocutor a análise crítica e construção de seu ponto de vista sobre a interação comunicativa.

Com base nesses aspectos, a palavra dita, verbalizada como signo ideológico e o contexto extraverbal presentes no qual são produzidos os enunciados, interagem de forma implícita, passando a constituir um contexto sociocultural amplo, articulando esses três fatores e conferindo ao discurso seu ‘querer dizer’. Conforme Volochinov (1976),

[...] a situação extraverbal está longe de ser meramente a causa externa de um enunciado; ela não age sobre o enunciado de fora, como se fosse uma força mecânica. Melhor dizendo, a situação se integra ao enunciado como uma parte constitutiva essencial da estrutura de sua significação (VOLOCHINOV, 1976, p. 5).

Quando se referiu ao discurso cotidiano comum, este autor argumentou que “a essência social da palavra aparece aqui mais clara e nitidamente, e a relação do enunciado com o meio social circundante se submete com maior facilidade à análise rigorosa” (VOLOCHINOV, 1976, p. 154). Assim, nega-se a análise da palavra isolada, de modo que, para essa adquirir algum sentido, deve ser considerada em seu contexto extraverbal, o que nas palavras do autor é descrito da seguinte forma:

A palavra na vida, com toda evidência, não se centra em si mesma. Surge da situação extraverbal da vida e conserva com ela o vínculo mais estreito. E mais, a vida completa diretamente a palavra, a que não pode ser separada da vida sem que perca seu sentido (*Id. Ibid.*).

Reconhece-se na palavra e na sua dependência em relação ao contexto extraverbal um dos pilares da teoria da enunciação do Círculo de Bakhtin. A compreensão de um enunciado concreto, para além da sua materialidade linguística requer, antes disso, compreendê-lo no horizonte comum dos interlocutores. Desta forma, “[...] a característica distintiva dos enunciados concretos consiste precisamente no fato de que eles estabelecem uma miríade de conexões com o contexto extraverbal da vida, e, uma vez separados deste contexto, perdem quase toda a sua significação” (*op. cit.*, p. 5). As relações ideológicas não se restringem ao conteúdo verbal do discurso e delimitam um contexto mais amplo que se manifesta na forma como esses enunciados são estruturados e percebidos pelos interlocutores.

Assim, o enunciado dá forma ao discurso indo muito além de simples formas gramaticais. O enunciado é o produto de relações entre indivíduos que interagem de diversas formas e que têm diferentes histórias de vida. Por isso, um enunciado é capaz de avançar para além da sua materialidade, estando carregado de mensagens implícitas, que podem pertencer tanto a um contexto social imediato quanto a contextos mais amplos.

5.2.4 Gêneros discursivos e dialogismo

Uma vez que todo ouvinte é também falante, seus enunciados procuram responder àquilo que lhe é dito, de modo que a consciência do outro também é levada em consideração. Assim, ao propor que o enunciado é a unidade de comunicação verbal e que estes atuam como conexões, Bakhtin chama a atenção para o fato de estes ‘conversarem’ entre si, refletindo-se mutuamente. Num primeiro momento, já descrito no texto, destacou-se o fato de que o enunciado por meio do qual se responde a outro falante revela aspectos presentes no enunciado anterior. Isto pode, fundamentalmente, ocorrer por duas vias: retomar a fala do outro para rebatê-la ou chegar a um consenso em determinada situação, o que requer uma reelaboração do enunciado anterior; ou por meio da apropriação das palavras do outro, simplesmente repetindo o mesmo enunciado sem que se demonstre significativa compreensão do conteúdo discutido.

Num segundo momento, cabe destacar que este processo dialógico inerente aos processos comunicativos, onde os diversos enunciados entram em contato, carrega consigo a necessidade da associação de contrapalavras. Desta forma, “cada um dos elementos significativos discerníveis em um enunciado e o enunciado inteiro como

entidade completa, se traduzem em nossas mentes a outro contexto ativo e responsivo [...] compreender é opor à palavra do locutor uma contrapalavra” (BAKHTIN, 2009, p. 137).

Assim, é viável supor que é também na associação de contrapalavras que se pode investigar o processo de compreensão de conceitos em um evento comunicativo e este é um conceito de fundamental importância para as análises que se deseja empreender. Portanto, cabe questionar quais são as contrapalavras associadas pelos estudantes num processo comunicativo em que podem estar envolvidos seus colegas ou seu professor ou em que medida estas contrapalavras revelam se os estudantes caminham no sentido de se apropriarem dos conceitos em estudo. Para responder a estas questões, é impossível pensar os indivíduos em um contexto que não seja caracterizado pelas interações discursivas.

Como já dito anteriormente, a voz em um enunciado não está isolada de outras vozes e isso, por sua vez, implica que em cada enunciado há pelo menos duas vozes. Todo enunciado, segundo a teoria de Bakhtin, está vinculado a uma voz, ou seja, é expresso a partir de uma perspectiva, por trás da qual se encerra o horizonte conceitual do falante, sua visão de mundo e sua intencionalidade. Este aspecto se refere, na verdade, à direcionalidade do enunciado, sem a qual ele não pode existir.

Nas palavras de Wertsch, “o fato de que a direcionalidade implique pelo menos duas vozes reflete o interesse de Bakhtin pelo construto teórico mais básico de seu enfoque: a dialogicidade” (WERTSCH, 1993, p. 73) [tradução nossa]. Retomando os parágrafos anteriores, ao se reconhecer que os enunciados interagem uns com os outros, apontando-se a presença de mais de uma voz no discurso, reconhece-se o que Bakhtin chama de interanimação de vozes, um processo característico da comunicação verbal entre as pessoas.

Nesse processo comunicativo, os enunciados se apresentam sob formas típicas, que são definidas e relativamente estáveis, ou seja, empregam gêneros discursivos, que correspondem a situações típicas de comunicação verbal. Para Bakhtin e seu círculo, a linguagem é, então, compreendida como um fenômeno social concreto, e está vinculada de forma muito intensa aos condicionamentos da vida humana. Cabe afirmar que o conteúdo, os estilos de linguagem e a construção composicional dos enunciados estão intimamente ligados entre si e são determinados em função das necessidades dos campos da atividade humana nos quais esses enunciados acontecem (BAKHTIN, 2009).

Desta forma, Bakhtin destaca que a linguagem é empregada sempre por meio de atos completos de fala (os enunciados), concretos e caracterizados pelos diversos campos da atividade humana.

A análise da natureza dos enunciados e as particularidades dos gêneros⁷³ envolvidos pode fornecer importantes informações acerca do processo ensino-aprendizagem tanto no que se refere aos recursos empregados pelo professor e seu papel na sala de aula quanto em relação à apropriação ou não pelos alunos dos enunciados do professor e aqueles oriundos de outras fontes.

5.3 Procedimentos de análise

Nesse quadro teórico bakhtiniano são enfatizados alguns elementos para a análise das interações discursivas entre estudantes durante a realização de atividades de simulação computacional centradas no segundo tipo de complementaridade e no emaranhamento quântico.

Considerando o conteúdo dos enunciados, os estilos de linguagem empregados e a construção composicional dos mesmos procura-se responder as questões de pesquisa, identificando: (1) as contrapalavras utilizadas pelos estudantes no discurso oral e escrito a fim de se apropriarem de uma classe de conceitos em FQ; (2) o papel desempenhado pelas contrapalavras utilizadas pelos estudantes durante a aprendizagem de um novo conceito com o qual se deparam; (3) os gêneros discursivos empregados tanto pelo professor quanto pelos estudantes ao interagirem entre si; (4) a forma como as diversas vozes presentes nos discursos dos alunos interferem na aprendizagem dos conceitos básicos envolvidos.

⁷³ Segundo Bakhtin (1997), é possível distinguir dois tipos de gêneros discursivos: o primário, mais simples (conversas, debates, quadros, fotografias) e o secundário, que tem maior grau de complexidade (anúncios, romances, discursos científicos) e que pode incorporar o anterior.

6 METODOLOGIA DA PESQUISA E RESULTADOS

Por se tratar de um estudo qualitativo, em que se pretende compreender um contexto específico e as complexas relações que se estabelecem, não se deseja produzir generalizações ou transferir as conclusões de um contexto para outro (JOHNSON e CHRISTENSEN, 2008). Desta forma, a opção pela pesquisa qualitativa aqui desenvolvida deve-se à estrutura das questões de pesquisa que foram propostas. Além disso, o tamanho da ‘amostragem’ utilizada neste estudo adéqua-se aos propósitos desta investigação: estudar com profundidade um contexto sociocultural específico, caracterizado por indivíduos utilizando ferramentas culturais em um ambiente de trabalho colaborativo. Nesta investigação, estudou-se um fenômeno aberto, sem expectativas iniciais rígidas, de modo que as hipóteses e explicações teóricas têm como base as interpretações dos pesquisadores a partir do que foi observado. Sendo um estudo de eventos na sua forma natural, sem manipulação de variáveis e considerando que os enunciados produzidos ocorreram para um contexto específico e se baseiam na análise de relações e processos que integram o contexto estudado, não há por que se preocupar com tamanho de amostragem e, muito menos, desejar grandes generalizações (MARSHALL, 1996).

6.1 Atividades de ensino e coleta de dados

Conforme já descrito na seção 1.2 deste texto, foram realizados um estudo piloto (primeira etapa), com professores de Física, e duas intervenções didáticas⁷⁴ em turmas regulares de estudantes de Licenciatura em Física (segunda e terceira etapas).

O estudo piloto foi realizado em outubro/2012 no âmbito de um curso⁷⁵ de extensão, a partir do estudo da complementaridade onda-partícula, com 3 participantes (um professor de Física do Ensino Médio e duas estudantes do último semestre de Licenciatura em Física que já atuavam nas escolas). As intenções com esta primeira etapa da pesquisa eram testar o nível de compreensão do pesquisador em relação aos

⁷⁴ Tanto os participantes do estudo piloto quanto os estudantes da disciplina de Física Moderna e Contemporânea I foram informados sobre a realização da pesquisa, seus objetivos e forma com que seria conduzida a coleta de dados, sendo convidados a assinarem um termo de consentimento, o qual está no Apêndice A.

⁷⁵ Os conteúdos explorados no curso estão citados no Apêndice B.

conteúdos, o *software*, que ainda estava em processo de reformulação e os procedimentos de análise. Isso implicou também a organização dos roteiros exploratórios de modo que estes possibilitassem a exploração das simulações, servindo como um guia para os estudantes e organizando a coleta de dados na pesquisa. A proposta era que os roteiros não se tornassem um jogo de perguntas e respostas, mas instrumentos capazes de desafiar os alunos a pensarem em torno dos problemas apresentados.

As intervenções didáticas nas turmas de Física Moderna e Contemporânea I (6º semestre do curso de Licenciatura em Física no IFRS-BG) foram conduzidas em dezembro/2012 e novembro-dezembro/2013 (segunda e terceira etapas, respectivamente). Participaram da segunda etapa 10 estudantes e, da terceira etapa, 2 estudantes.

Conforme já citado na seção 1.2, a ementa da disciplina Física Moderna e Contemporânea I é dedicada, basicamente, a aspectos da Velha FQ, além de apresentar em seus conteúdos apenas a teoria de Schrödinger dos fenômenos quânticos. As intervenções didáticas na disciplina de FMC I foram realizadas sobre aspectos que não estavam contemplados na ementa, de modo que foi necessário conceber, mesmo que informalmente, uma reestruturação dos conteúdos, levando para sala de aula uma visão mais ampla da FQ.

A fim de atender os conteúdos mínimos da ementa, optou-se por iniciar a abordagem da FMC (propagação da luz, emissão de radiação por corpos aquecidos, calor específico dos sólidos a baixas temperaturas) e a FQ (espectroscopia, hipótese de quantização de Planck, quantização das radiações eletromagnéticas por Einstein) a partir de problemas não resolvidos pela abordagem clássica. Esta introdução da disciplina não consistiu em um reducionismo da FQ, uma vez que não se trata colocar em xeque argumentos clássicos. Mais do que isso, procurou-se fazer uma abordagem que proporcionasse aos estudantes um contato com uma visão de ciência que difere daquela visão instrumentalista com excessivo destaque dado ao formalismo matemático, a qual normalmente é empregada em cursos desse tipo.

Assim, não se concedeu um papel historiográfico à exposição das primeiras teorias da FQ, mas buscou-se constituir um contexto para promoção de discussões sobre a forma de interpretar os fenômenos físicos, repensando certos princípios da Física Clássica como o determinismo e a causalidade, focando as discussões em conceitos

fundamentais da FQ. Ao se situar historicamente os estudantes, se pode proporcionar a eles uma visão que possibilite reconhecer a ciência não como uma atividade que pode ser reduzida a uma simples sucessão de descobertas, mas um grande movimento intelectual com fortes raízes socioculturais e que envolve embate de diferentes ideias. Neste embate, o uso de argumentos não racionais não é raro, assim como relações de poder, questões institucionais, crenças, valores, etc. que também estão presentes.

Ao estudar as propriedades corpusculares da radiação por meio da sua interação com a matéria (efeito fotoelétrico, espalhamento Compton, produção e aniquilação de pares), princípio da indeterminação de Heisenberg e modelo atômico de Bohr priorizou-se uma abordagem mais voltada aos aspectos conceituais.

O cenário da pesquisa começou a ser desenhado com o estudo do postulado de Louis de Broglie e sua interpretação realista-dualista da FQ. Embora as interpretações da FQ não sejam o foco desta pesquisa, o fato de se abordar o postulado de De Broglie a partir da sua interpretação realista-dualista de certa forma já sinaliza na direção de uma readequação dos conteúdos na disciplina de FMC I.

Os conteúdos explorados tiveram sequência com a interpretação realista-ondulatória de Schrödinger e sua formulação matemática para a FQ. O estudo da equação de Schrödinger foi conduzido tendo-se o objetivo de mostrar aos estudantes aquilo que se julga essencial para sua formação inicial como licenciandos. Nesse sentido, ao invés de desenvolvê-la para o átomo de Hidrogênio, como comumente ocorre nos cursos de FQ, optou-se por interpretar fisicamente as probabilidades que se obtém das funções de onda que possam ser consideradas soluções fisicamente aceitáveis da equação de Schrödinger.

No início de cada uma das três etapas da pesquisa foi realizada e gravada em áudio uma conversa individual com os participantes (uma entrevista semiestruturada⁷⁶) a fim de obter algumas informações sobre sua trajetória enquanto estudantes e expectativas quanto ao estudo da Física Moderna para possibilitar a caracterização do contexto extraverbal amplo (contexto sociocultural).

⁷⁶ Durante esta conversa, os estudantes foram solicitados a falar sobre: I) percurso acadêmico, desde o Ensino Médio até o momento atual, na graduação; II) atuação do professor do Ensino Médio em sala de aula; III) visão que veiculam sobre a educação e sobre o ensino de Física no Ensino Médio; IV) visão que veiculam sobre o ensino de FMC no Ensino Médio; V) perspectivas quanto à inserção da FMC em suas aulas enquanto futuros professores;

Nas três etapas da pesquisa, o estudo dos conceitos de interesse sempre iniciou com aulas expositivas/dialogadas (com a utilização de quadro branco e projeção de slides), teve continuidade com as atividades de simulação computacional e era concluído com um novo conjunto de aulas expositivas/dialogadas. A exposição inicial realizada pelo professor/pesquisador visava introduzir questões iniciais ligadas ao tema em estudo, ou seja, estabelecer um plano inicial de intersubjetividade, sem entretanto, explicar ou discutir os fenômenos e conceitos envolvidos. Após a realização das atividades de simulação computacional, mas antes da nova seção de aulas expositivas, os estudantes eram instruídos a realizar a leitura de seções de alguns livros, pré-determinadas pelo professor/pesquisador. Ao retomar, com os estudantes, o material utilizado na exposição inicial e os roteiros exploratórios, buscou-se discutir a fenomenologia envolvida estabelecendo-se uma conexão entre os aspectos das teorias físicas envolvidas com aquilo que foi vivenciado na simulação computacional. As leituras realizadas pelos estudantes, sob recomendação do professor/pesquisador, foram: Aspect (2006); Gilmore (1998), prefácio e os quatro primeiros capítulos; Pessoa Jr. (2005), os seis primeiros capítulos. Na segunda e terceira etapas da pesquisa foram acrescentados os livros-texto de Eisberg e Resnick (1979), - capítulo 3 - e Tipler e Llewellyn (2006), - capítulo 5 - por se trataram de referências da bibliografia básica da disciplina em questão. Além disso, na terceira etapa utilizou-se Pessoa Jr. (2006), - capítulos XXI e XXII- onde são tratados conceitos da segunda revolução da FQ.

As atividades de simulação computacional com o IVMZ foram realizadas no laboratório de informática, acompanhadas de roteiros exploratórios para orientação dos estudantes e de gravação em áudio. Nas três etapas, o primeiro roteiro exploratório foi utilizado como forma de promover o reconhecimento dos dispositivos presentes no *software* e o estudo da dualidade onda-partícula, enquanto que o segundo roteiro exploratório teve como propósito orientar o estudo da complementaridade onda-partícula. Na terceira etapa foi introduzido um novo roteiro exploratório (terceiro roteiro), a fim de guiar os estudantes na simulação com pares de fótons emaranhados. Durante a realização da primeira e segunda etapas, o *software* passou por modificações no sentido de implementar novas funcionalidades e os roteiros exploratórios foram revisados e adaptados tanto para corrigir algumas deficiências da etapa anterior quanto atender às novas demandas.

Todos os registros escritos e as gravações em áudio passaram por uma análise prévia para seleção do material a ser transcrito. Para organizar as transcrições utilizaram-se os seguintes critérios:

- (I) reticências ao longo do texto: indicam que houve uma pausa curta no discurso;
- (II) reticências entre parênteses ao longo do texto: indicam que houve uma pausa mais longa no discurso;
- (III) reticências entre colchetes: usadas para indicar que a transcrição iniciou a partir de determinado ponto, deixando de lado trechos anteriores, sem prejudicar o sentido da ideia que foi expressa;
- (IV) dois pontos duplos: representam que houve o prolongamento do som de uma palavra;
- (V) aspas: destacam os trechos que se referem às citações literais;
- (VI) apóstrofes: marcam uma mudança na entonação, indicando certa valoração dos termos empregados naquele trecho do discurso;
- (VII) barras: indicam que houve um truncamento no discurso;
- (VIII) texto entre colchetes: comentários adicionados durante a transcrição;

É sobre a transcrição desses dados que serão empreendidas as análises dos enunciados, conforme instrumento analítico organizado na seção 5.3.

6.2 Primeira etapa da coleta de dados: o estudo piloto

Com o propósito de discutir o currículo de Física vigente no Ensino Médio, embasado nos resultados das pesquisas em ensino na área, procurou-se discutir temas de FMC para conscientizar os participantes quanto a necessidade de inserção desta temática nas salas de aula e também capacitá-los em relação a alguns conceitos fundamentais. Discutiu-se, inicialmente, a estruturação da disciplina de Física no Ensino Médio atual considerando-se os temas tradicionalmente estudados a fim de possibilitar que os participantes apontassem os conteúdos que abordam nas suas aulas.

A partir da verificação de que a FMC não está presente nos currículos das respectivas escolas, procurou-se situar os participantes em relação à finalidade do curso, a qual não era instrumentalizá-los no sentido de propor novas metodologias de ensino, mas discutir alguns temas de FMC e prover a base teórica necessária à sua inserção.

Desta forma, recorreu-se à pesquisa já existente tanto em termos de inserção de FMC no Ensino Médio quanto de conteúdos como a supercondutividade e tópicos da FQ Contemporânea por meio do IVMZ (complementaridade onda-partícula, interpretação de Copenhagen). Abordaremos aqui, apenas o estudo realizado sobre o ensino da FQ.

O estudo da complementaridade onda-partícula foi realizado com a mediação do IVMZ e roteiros exploratórios com os três participantes (identificados por professores P1, P2 e P3) trabalhando juntos. Antes disso, já havia sido discutido com os professores as implicações teóricas da dualidade proposta por De Broglie.

Para dar início à atividade de simulação, os professores exploraram o *software* segundo o roteiro exploratório I (Apêndice C)⁷⁷. Simulando com o interferômetro em regime clássico e, posteriormente em regime quântico, este roteiro possibilitou a identificação dos dispositivos no interferômetro (espelhos, divisores de feixe, detectores demolição e não-demolição) e o papel de cada um, além de apresentar questionamentos sobre a formação de padrões de interferência nos anteparos e sua relação com a identificação de caminho tomado pelos fótons. Esta atividade teve a duração de uma hora e quarenta minutos e não houve a necessidade de intervenção do pesquisador durante sua realização.

Na semana seguinte, teve continuidade o estudo da dualidade onda-partícula trabalhando-se questões ligadas ao seu ensino como forma de promover o contato dos alunos com uma Física conceitualmente mais rica do que aquela tradicionalmente ensinada nas escolas de Ensino Médio. Além disso, foram introduzidos os conceitos de visibilidade e distinguibilidade - os quais foram recebidos como algo novo pelos professores-, como informações necessárias para a completa descrição da interferência em regime quântico.

Na terceira semana, os professores utilizaram o *software* e o roteiro exploratório II (Apêndice D) para o estudo da dualidade onda-partícula, considerando-se o princípio da complementaridade e a existência de fenômenos intermediários. Esta atividade teve a duração de uma hora e vinte minutos e suscitou alguns debates entre os participantes, uma vez que estes tentavam explicar os fenômenos observados com fótons sem abrir mão de alguns conceitos clássicos já estabelecidos.

⁷⁷ Este roteiro foi reformulado após a conclusão do estudo piloto. A simulação em regime quântico foi reorganizada em um roteiro exploratório à parte, que consiste no roteiro exploratório II usado com a turma de FMC I (segunda e terceira etapas da pesquisa).

Com o roteiro exploratório II em mãos os professores exploraram a simulação a partir da variação dos coeficientes de reflexão e transmissão nos divisores de feixe. Ao final da atividade, a intervenção do pesquisador ocorreu no sentido de apresentar a complementaridade onda-partícula como uma forma de interpretação dos padrões de detecção visualizados nos anteparos e como uma das teses da Interpretação de Copenhague.

Na parte final do curso houve uma introdução à notação de Dirac para, através da álgebra dos operadores, 'construir' um operador que representasse a ação do primeiro divisor de feixe sobre um fóton no interferômetro.

6.2.1 O contexto sociocultural de onde falam os professores

As professoras P1 e P2, com idades entre 20 e 25 anos, eram estudantes do último semestre do curso de Licenciatura em Física no Campus Bento Gonçalves. A inclusão destas na categoria 'professoras' se deve aos seguintes fatores: - estavam cursando o último semestre do curso; - já haviam cursado as disciplinas voltadas ao estudo da FMC; - atuavam como professoras de Física no Ensino Médio, por meio de contrato temporário; - necessidade de criação de uma categoria comum aos participantes, visto que o curso era voltado à professores.

O professor P3 é licenciado em Física pela UFRGS, tinha entre 35 e 40 anos, e atuava no magistério da rede estadual de ensino há 10 anos, sempre na mesma escola.

Em relação ao contexto social local em que se inserem os três participantes, pode-se dizer que o mesmo é característico de pequenas cidades, mantendo tradições características da imigração italiana enraizadas em cidades com grande potencial de crescimento.

A professora P1, em relação à sua formação, conhecimentos relativos à FMC e perspectivas quanto à inserção desta temática em suas aulas, revelou-se bastante insegura.

1. P1: Embora eu não tenha me apaixonado por esta área da Física [refere-se à
2. FMC], sei que é importante eu me aprofundar um pouco mais pra poder me
3. preparar melhor. Estou acabando a licenciatura, mas existem muitas coisas
4. que eu ainda não sei, então tenho que estar sempre buscando, sempre
5. procurando aprender alguma coisa a mais. Até poderia ensinar algum tema

6. da FMC, mas se tivesse mesmo que fazer nem sei como seria. Sei que é
7. importante levar um tema diferente, mas esses conteúdos são muito difíceis.

Apesar de reconhecer sua condição de ‘inconclusa’ em termos de aprendizagem (linha 3), buscar aprender um pouco mais em uma área (linha 2) e mencionar a importância do ensino da FMC (linha 7), essa professora recai em um discurso bastante conhecido, que coloca no grau de dificuldade dos conteúdos um empecilho para seu desenvolvimento na escola (linha 7). P1 manifesta alguma pré-disposição para ensinar conteúdos de FMC (linha 5), entretanto, compartilha a visão de que o professor é um mero transmissor de conteúdos e cumpridor de ordens. Ao mencionar “se tivesse mesmo que fazer” (linha 6), parece que P1 está aguardando alguma instância superior (como documentos oficiais, por exemplo) ordenarem alguma ação nesse sentido. Essa análise do papel do professor pode ser encontrada na obra de Contreras (2002), que afirma que os professores são vítimas de uma política educacional que os coloca em uma posição proletarizada, executando tarefas pensadas por outros ou, como o próprio autor afirma, atuam como meros “executores de decisões externas” (p. 51). A impressão que se tem é que essa professora vive um dilema, entre o que acredita ser importante ensinar e o que se julga em condições de fazer.

A professora P2, em relação às suas perspectivas quanto à atuação em sala de aula e sobre o ensino de Física menciona que:

1. P2: Como já to em sala de aula, vejo que não é muito fácil não. A gente quer
2. desenvolver um conteúdo mais interessante e daí os alunos não conseguem
3. acompanhar, por outro lado, a escola também não incentiva. Parece que tem
4. um certo conformismo, um faz de conta. Só faltam dizer: ‘não insiste porque
5. eles nunca vão aprender mesmo’ ou então, ‘ensina qualquer coisa que não vai
6. fazer diferença’. Eu não penso assim. To começando e vou começar com tudo.
7. Quero ensinar a pensar, a estudar uma Física mais atual.

Essa professora destaca a onda de conformismo na escola (linhas 3-6), propõe-se o desafio de levar para a sala de aula um ensino de melhor qualidade e, para isso, acredita que o professor tem um papel de grande relevância (linhas 6-7), atuando como um norteador da sua própria prática e aproximando-se da noção de professor reflexivo (CONTRERAS, 2002).

Quanto à atuação do professor em sala de aula e a realidade com que convive, P3, apresenta o seguinte relato:

1. P3: Procuo sempre levar alguma coisa diferente para motivar os alunos, mas
2. muitas vezes quando faço isso, acabo saindo mais frustrado ainda. Tu tem uma
3. turma de 30 alunos e consegue despertar o interesse de, no máximo, uns 3 ou
4. 4 e quando tenta puxar para a interpretação de algum conceito daí sim que tu
5. vê que eles não querem pensar. Preferem tudo ‘mastigadinho’, mas isso não é
6. ensinar Física. Sei que consigo atingir poucos alunos, mas estou tentando
7. realmente ensinar Física pra eles. Sou o único formado em Física na minha
8. escola, os outros são formados em Matemática. Então, como sou a minoria
9. que procura fazer alguma coisa diferente, parece que sou eu que estou errado.
10. Uma professora, esses tempos, me disse pra parar de inventar muita coisa
11. porque senão os alunos das outras turmas iriam começar a querer também.
12. Quer dizer que elas querem continuar fazendo de conta, né.

A fala desse professor deixa transparecer que existe um grande distanciamento entre a Física que se pretende que seja levada às escolas e aquela que realmente é apresentada aos alunos (linhas 10-11). Revela-se uma situação mais grave: o professor que pretende implementar um norteamento diferente dos demais (possivelmente tarefairos), segundo o discurso citado de uma professora, poderia influenciar outras turmas a desejarem vivenciar experiências didáticas mais elaboradas e inovadoras, o que exigiria dos demais professores no mínimo uma postura diferente, que poderia modificar o próprio contexto. Isso pode ser interpretado como uma violência velada, que tenta ceifar do professor qualquer ímpeto que possa levar a escola e sua comunidade a repensar a prática da simples reprodução acrítica de metodologias, conteúdos e outros procedimentos pedagógicos. Isso revela uma tensão ocorrida no ambiente escolar: de um lado se tenta manter o *status-quo* do professor proletarizado, cômodo para alguns e, provavelmente, para a própria escola; de outro alguns tentam romper essa situação com iniciativas isoladas⁷⁸.

⁷⁸ Essa tensão é um exemplo de que há uma relação entre o contexto sociocultural e a produção dos discursos, mas que essa relação não é uma simples relação causa-efeito (ou seja, a produção discursiva não é um simples efeito do contexto sociocultural, pensando em relação causal como nas Ciências Naturais). Esse contexto mantém uma relação com a produção discursiva, mais complexa, na qual o discurso pode ser tanto reprodutivo do contexto (como no caso da professora que tenta preservar o status de professor proletarizado) quanto transformativo (como no caso do professor que deseja inserir inovações e nortear sua própria prática).

A passividade dos alunos (linhas 3-5) frente às práticas em sala de aula também é um aspecto relevante. Esta passividade apontada por P3 e a onda de conformismo parecem se alimentar mutuamente, de modo que a escola fecha-se ainda mais frente à qualquer iniciativa que vise romper esse ciclo vicioso. Outro elemento que chama atenção para uma realidade bastante presente nos dias atuais é a formação dos professores (linhas 7-8), ou seja, professores que não têm formação em Física ministrando esta disciplina no Ensino Médio.

6.2.2 Síntese dos diálogos entre os professores de Física e encaminhamentos

A análise das gravações de áudio das interações discursivas possibilitou destacar alguns trechos que consideramos relevantes para a pesquisa em função do seu conteúdo, tanto no que diz respeito às estratégias utilizadas pelos professores para solucionar os problemas apresentados quanto em relação às dificuldades frente ao *software* e roteiros exploratórios. Apesar da importância dessa etapa da pesquisa para a organização da segunda e terceira etapas, optamos por apresentar apenas uma síntese dos resultados obtidos e as suas implicações para o restante do trabalho.

As simulações realizadas por esses professores contaram com o uso do IVMZ em regime clássico, num primeiro momento e, em seguida, em regime quântico.

O professor P3, possivelmente em função da sua experiência em sala de aula, teve um papel determinante nas atividades. Esse professor conseguiu imediatamente reconhecer semelhanças entre a simulação no IVMZ em regime clássico e o experimento da dupla fenda. Seu discurso parece ser moldado por vozes oriundas de outros contextos, no qual está provavelmente inserida a sua formação e os livros didáticos com os quais teve contato (que, tradicionalmente, não citam o IMZ). Ao utilizar algum recurso semiótico (por exemplo, uma representação pictórica do experimento de Young, falas de um professor ou textos explicativos, entre outros) proporcionou um bom leque de ferramentas culturais que auxiliaram na organização de suas ações no IVMZ. Apesar do caráter interativo utilizado por esse professor na abordagem comunicativa, percebeu-se certa liderança em relação aos demais no que diz respeito à organização das ações do grupo durante a atividade.

A forma natural como P3 solucionou os problemas relacionados à interferência em dupla fenda (formação e desaparecimento dos padrões nos anteparos), acredita-se, pode ser atribuída ao seu contexto sociocultural, no qual anteriormente teve contato com

recursos semióticos que proporcionam pleno domínio dos conceitos básicos envolvendo esse fenômeno. Também observa-se que em alguns momentos o uso de termos característicos do discurso científico como, por exemplo, “experimento da fenda dupla”, “diferença de caminho óptico” e “indivisibilidade de fótons” conferiu certa autoridade ao discurso. P3 procurou elaborar seus enunciados sobre o fenômeno da interferência a partir do estabelecimento de relações entre as suas observações e os termos científicos utilizados: “... sei exatamente por onde os fótons passaram”, “some a figura de interferência”. Nota-se sua grande aderência ao próprio enunciado, demonstrando boa familiaridade com a situação didática proposta, provavelmente pelo fato de ter disponível para si um leque de ferramentas culturais apropriadas para essa situação didática.

Enquanto P2 organizou seu discurso mais em função dos enunciados de P3, concordando ou discordando desse, o professor P1 empreendeu um diálogo com o roteiro exploratório, que parece ter surtido mais efeito sobre suas ações do que a interação com os colegas. Por outro lado, este diálogo com o roteiro assumiu grande importância não só na dimensão individual, mas coletiva, quando conseguiu redirecionar a ação do grupo saindo de um momento de dúvida e encaminhando-se para a solução de um problema: “aqui ele também tá falando em diferença de caminho, óh”. Ao se referir a “ele”, este professor estava se referindo ao pesquisador, que se fez presente no discurso através da mediação com o roteiro exploratório.

No que diz respeito à simulação com o IVMZ em regime quântico, os professores não demonstraram uma compreensão adequada da relação entre conhecimento sobre o caminho associado aos fótons e a visibilidade do padrão de interferência, percebendo apenas que estes são complementares. Nesse estágio da simulação, as intervenções de P1 se restringiram a enunciados com um conteúdo um tanto óbvio, resultante apenas de observações dos anteparos à sua frente e que não evidenciavam que este caminhava no sentido de uma compreensão adequada do fenômeno estudado. Conforme o grau de dificuldade das tarefas aumentou, P1 foi deixado de lado por seus pares. O repertório de ferramentas culturais de que dispõe este professor demonstrou que, possivelmente, o tema proposto para discussão estava além da ZDP.

Os demais professores também não demonstraram ter compreendido plenamente o fenômeno observado, visto que a análise de seus enunciados permitiu inferir que eles interpretaram o fenômeno como se fosse um jogo de probabilidades: “isso é estatístico”, “tinha cinquenta por cento de chance”, “só dez por cento passa, daí só trinta e cinco por

cento vai pra esse detector”, “noventa por cento vai por esse caminho e desses noventa só trinta e cinco por cento vai pra esse detector”, além de outros enunciados que se restringem a análises numéricas. O âmago da complementaridade interferométrica, que estabelece uma relação complementar entre a visibilidade do padrão de interferência e a possibilidade de inferir corretamente o caminho associado ao fóton no interferômetro, parece ter sido percebido apenas a partir de um ponto de vista numérico, não apresentando elementos suficientes para crer em uma compreensão do sentido físico da relação entre essas grandezas e o fenômeno em si.

Pode-se considerar que a construção conceitual ao longo da simulação com o IVMZ ocorreu em diferentes ritmos para os professores, uma vez que P2 passou a utilizar o termo ‘interferência’ no seu discurso. O professor P3, por sua vez, interpretou facilmente a interferência em regime clássico a partir da óptica ondulatória e conseguiu incorporar o conceito de distinguibilidade aos seus enunciados “... a distinguibilidade tem a ver com a informação disponível” e “quanto menos interferência, mais informação sobre a trajetória do fóton”, enquanto P1, mesmo ao final da atividade ainda demonstrava pouca familiaridade com os fenômenos estudados.

Em relação à associação de contrapalavras, em um dos enunciados de P3 a expressão “mais limpa” surge quando este se refere à visibilidade dos padrões de interferência. Embora esse professor tenha usado um recurso linguístico não muito preciso, pois a expressão mais adequada para melhor descrever o conceito físico relacionado seria “maior contraste”, certamente a expressão “mais limpa” o conduziu bem no processo de negociação de significados no processo de compreensão do conceito de visibilidade do padrão de interferência. Assim, a associação dessa contrapalavra permite dizer que este professor está em processo de aprendizagem de um novo conceito, traduzindo para as suas palavras a observação de um fenômeno e o significado físico associado a ele (BAKHTIN, 1997).

Em uma pesquisa voltada ao ensino de um tópico específico de Física (no caso, FQ) e cuja perspectiva se baseie em um referencial sociocultural, o objetivo não é unicamente procurar evidências de aprendizado dos conceitos envolvidos. É possível procurar também evidências do uso apropriado de ferramentas mediadoras (como o *software* IVMZ) aliado a uma enculturação gradual no cenário das atividades propostas, o que envolve internalização de um sistema de recursos semióticos específicos

necessários tanto para compreender o *software* quanto o próprio tema foco (lembrando que essa internalização é um processo primariamente social).

Embora se possa perceber que seria necessário mais tempo para que fosse possível atingir uma negociação de significados mais efetiva do fenômeno, pode-se inferir, pelas interações discursivas, que houve sinais de construções conceituais interessantes como no caso dos professores P2 e P3.

Particularmente, no que diz respeito à simulação dos fenômenos intermediários os professores parecem ter se detido mais em aspectos estatísticos do que na Física envolvida. Uma alternativa possível encontrada para tentar superar essa deficiência foi a nova redação de alguns questionamentos exibidos nos roteiros, de modo a exigir maiores explicações em termos da natureza do fenômeno observado.

Ao realizar a análise dos enunciados, constatou-se que a atividade com o IVMZ poderia ser mais ambiciosa no sentido de promover maior aproximação⁷⁹ dos professores com a complementaridade onda-partícula, indicando a necessidade de uma maior familiarização do pesquisador com o *software*, que ainda estava sendo programado, e também a reformulação dos roteiros exploratórios. Essa necessidade de reformulação dos roteiros é o que consideramos como sendo um dos resultados dessa primeira etapa da pesquisa. O roteiro exploratório I (Apêndice C), rapidamente passava de uma abordagem clássica, a partir da emissão de luz *laser*, para a simulação utilizando fótons e isso pode ter representado alguma dificuldade aos professores que participaram do estudo piloto, ou seja, dúvidas relacionadas ao *software* podem ter induzido o pesquisador a interpreta-las como estando ligadas aos aspectos físicos envolvidos. Por exemplo, se a função do segundo divisor de feixe não é compreendida todo o restante das atividades fica comprometido. Optou-se por modificar o primeiro roteiro exploratório utilizado no estudo piloto, explorando com mais detalhes os dispositivos do interferômetro como, por exemplo, o papel dos filtros polaroides.

O roteiro exploratório II (Apêndice D) utilizado para estudo da complementaridade onda-partícula, da forma como foi organizado, acabava induzindo os participantes a interpretações restritas a aspectos numéricos, visto que os próprios questionamentos

⁷⁹ Isso seria alcançado se os professores conseguissem estabelecer relações entre os conceitos envolvidos apelando mais para os aspectos físicos ao invés de centrarem-se nas análises das contagens nos anteparos e a partir daí perceberem uma relação inversa entre visibilidade e distinguibilidade e pouco discutirem sobre a natureza dos fenômenos. Afirmar que quanto maior a visibilidade menor é a distinguibilidade é algo que se pode chegar sem que isso revele aprendizagens mais profundas.

que eram feitos já tinham esse direcionamento. A distinguibilidade, por exemplo, um conceito fundamental para compreender as naturezas corpuscular e ondulatória dos fenômenos como sendo complementares, era analisada apenas do ponto de vista numérico que não contribuía para que se estabelecessem relações com o fato de as alterações nas probabilidades implicarem informação disponível e, conseqüentemente, alteração nos padrões obtidos nos anteparos. Este roteiro foi totalmente reestruturado para os estudos seguintes, de modo a deslocar o foco da análise numérica para questionamentos que exigissem análises mais amplas, como a relação entre distinguibilidade, visibilidade, probabilidades de reflexão e transmissão nos divisores de feixe e os padrões obtidos nos anteparos.

Outro aspecto levado em consideração foi a redação dos roteiros, a fim de diminuir a quantidade de informações nas questões para que a leitura dos itens não se tornasse cansativa e conceder mais liberdade aos participantes para explorarem o *software*, sem orienta-los a todo momento para qual dispositivo deveriam olhar. Isso aproxima-se mais da proposta de roteiro exploratório.

Apesar de se evidenciar ao longo dessa etapa da pesquisa um comportamento comum de sala de aula entre os professores que participaram do estudo, característico de uma cultura escolar predominante, com a busca por respostas imediatas para resolver um problema proposto, o contexto extraverbal explorado na seção 6.2.1 apresentou três indivíduos falando de lugares socioculturais bastante diferentes. O que se observou nas interações discursivas indica que o professor P3 mostra mais proficiência em um repertório maior de ferramentas culturais, enquanto que os professores P1 e P2 não parecem tão fluentes no uso dessas ferramentas, acarretando em maior dificuldade de entender e se expressarem a respeito dos conceitos físicos inerentes aos eventos que envolvem os fótons no IVMZ.

Assim, outro resultado interessante dessa etapa de pesquisa diz respeito a importância de não voltar o objeto de investigação apenas para a simulação e roteiros em si e para as interações discursivas que esses recursos possibilitam. Mais do que isso, o contexto extraverbal dos professores reforça a nossa crença de que este é determinante para a forma como os interlocutores ‘encaram’ as atividades e organizam seus enunciados.

6.3 Contexto de realização da segunda e terceira etapas da pesquisa

O ponto central da pesquisa, na segunda etapa, consistiu no estudo da dualidade onda-partícula e, retomando o viés epistemológico e ontológico subjacentes às interpretações da FQ, o tópico foi apresentado como sendo responsável por uma revolução na forma de encarar a teoria quântica. Nesse sentido, ao adotar-se uma interpretação para o fenômeno defendeu-se a complementaridade onda-partícula, sendo a complementaridade uma das teses da Interpretação de Copenhague. Na terceira etapa da pesquisa, além do estudo da complementaridade onda-partícula, explorou-se o fenômeno do emaranhamento quântico.

Tanto o estudo da complementaridade onda-partícula quanto do emaranhamento quântico foram realizados por meio da simulação com o IVMZ, estando os estudantes dispostos em duplas e utilizando um computador, que continha instalados o *software* e o gravador de áudio.

6.3.1 Contexto extraverbal dos interlocutores

O contexto extraverbal refere-se ao conjunto de circunstâncias que não são de natureza linguística e que podem ser percebidas de forma direta ou já serem conhecidas pelos interlocutores, ou seja, é tudo aquilo que envolve a enunciação, podendo ser caracterizado em três níveis: o situacional imediato, o institucional ou o sociocultural, este último o mais amplo (PINTO, 1999). A caracterização do contexto extraverbal neste estudo está subdividida em contexto extraverbal imediato (situacional) e contexto extraverbal amplo (sociocultural) onde, no primeiro, estão aspectos que dizem respeito ao momento presente em que se inserem os interlocutores e, o segundo, a aspectos de caráter sociocultural.

Um panorama do contexto extraverbal imediato

O contexto extraverbal imediato, ou situacional, é caracterizado por oito estudantes de graduação em Licenciatura em Física na segunda etapa e dois na terceira etapa da pesquisa, matriculados em uma disciplina de Física Moderna e Contemporânea. Esta disciplina consiste no primeiro contato formal dos estudantes com a Física do século XX e foi desenvolvida sob um enfoque mais conceitual. A temática em estudo na segunda etapa de pesquisa e a que se referem os dados apresentados é a complementaridade onda-partícula, que foi sendo abordada a partir de atividades de

simulação computacional, mediadas por roteiros exploratórios. Os estudantes foram organizados em duplas (E1 e E2; E3 e E4; E5 e E6; E7 e E8) as quais foram definidas por eles próprios. Um estudante (E9) não quis participar da pesquisa, de modo que o material por ele produzido não foi coletado e outro (E10) dispôs-se a participar, mas preferiu trabalhar sozinho, inviabilizando sua participação na pesquisa por não ter participado das interações discursivas que constituíram os dados a serem analisados.

Os dados da terceira etapa se referem ao estudo da complementaridade onda-partícula e também do emaranhamento quântico, também obtidos a partir de atividades de simulação com o IVMZ e roteiros exploratórios. Os dois estudantes que participarem dessa etapa foram identificados por E11 e E12.

As figuras 8 e 9 ilustram momentos de interação durante as atividades de simulação com o IVMZ.



Figura 8: Interação entre dois estudantes mediada pelo IVMZ. Foi tomado o cuidado de não identificar os estudantes.



Figura 9: Momento de diálogo entre o professor e duas estudantes.

Contexto extraverbal intermediário: o contexto institucional

Faz parte também do horizonte comum desses estudantes o contexto educacional onde se inserem. Conforme já abordado de forma mais detalhada na seção 1.3, o contexto institucional onde se inserem estes estudantes (um Instituto Federal) é marcado por um discurso centrado na necessidade de atender as demandas locais e regionais que se apresentam. A legislação que se aplica a esta instituição prega a oferta de educação profissional e tecnológica com vistas à formação e qualificação voltada à atuação profissional, enfatizando-se o desenvolvimento socioeconômico.

Nesse sentido, a formação destes estudantes como futuros profissionais da educação, especificamente ensinando Física, é marcada pelo contato que estes estudantes têm, durante seu percurso formativo, com o debate acerca da dura realidade educacional brasileira e a grande necessidade que existe em formar mais professores nessa área.

Contexto extraverbal amplo: o contexto sociocultural

Nesta seção será feita uma descrição do contexto extraverbal no qual a produção discursiva ocorreu. Como anteriormente, essa produção não pode ter amputada de si esse contexto, pois todo enunciado sempre tem uma parte verbal e não verbal.

Aqui será delineado o contexto mais amplo, o sociocultural. Como aspectos que podem constituir um horizonte comum dos estudantes que participaram da pesquisa identificou-se que todos têm idades entre 20 e 25 anos e já tiveram alguma passagem recente pelas salas de aula do Ensino Médio por meio de Estágio Supervisionado (observação em sala de aula) e alguns, inclusive pela participação em programas de iniciação à docência ou iniciação científica. O grupo analisado era formado por quatro estudantes do sexo masculino (E1, E3, E4 e E12) e seis do sexo feminino (E2, E5, E6, E7, E8 e E11).

Antes da realização desse estudo, o pesquisador conversou separadamente com os estudantes, na forma de uma entrevista semiestruturada, a fim de coletar informações relacionadas, por exemplo, ao percurso acadêmico e à visão que veiculam sobre a educação e sobre o ensino de FMC no Ensino Médio. Isso proporcionou elementos que auxiliaram na caracterização do contexto sociocultural a partir do qual esses alunos falavam, ao se identificar com quais vozes dialogavam quando se manifestavam sobre questões envolvendo inovações didáticas nas escolas (principalmente no que se refere à inserção de tópicos de FQ).

Dada a natureza qualitativa da pesquisa, onde foram realizados registros de interações discursivas entre um total de cinco duplas de estudantes, o que acarretou uma grande quantidade de dados, torna-se inviável analisar todos eles nesse trabalho. A fim de possibilitar uma análise mais detalhada dos dados, após a transcrição dos mesmos, foram selecionadas três duplas para compor tal análise, sendo duas duplas que participaram da segunda etapa e a dupla participante da terceira etapa da pesquisa. O critério utilizado para escolha das duas duplas da segunda etapa da pesquisa foi a quantidade de enunciados nas interações discursivas e a coerência entre os enunciados e aquilo que estava proposto nos roteiros. A partir disso, selecionou-se as duplas E1E2, E5E6 e E11E12. Seguem alguns extratos dessa conversa que foram selecionados para análise.

Estudante E1:

Recorte 1

1. E1: Não dá pra ficar enchendo cada vez mais o currículo, agregando mais e
2. mais coisas. Não tem espaço. Daí, teria que acabar resumindo demais as
3. coisas e os alunos acabariam saindo sem saber a Física newtoniana.

Este estudante não considera que seja possível inserir tópicos de FMC no Ensino Médio e a forma como imagina sua inserção parece concordar com a concepção de que primeiro é preciso estudar toda a Física Clássica para somente depois passar ao estudo da FMC. Esse possível descrédito demonstrado pelo estudante pode estar relacionado ao fato de que a pesquisa na área parece produzir mais desencontros do que encontros entre a prática docente e seus resultados recentes. Talvez isso ocorra porque essa pesquisa ignora certos problemas e características típicas do contexto escolar, preocupando-se em demasia com a inovação sem que se crie um canal efetivo de parceria com as escolas e sua comunidade (da qual os professores fazem parte), o que proporcionaria um maior contato dos professores com os resultados de pesquisa (REZENDE e OSTERMANN, 2005).

Mesmo estando inserido em um contexto de formação inicial e talvez até não tendo consciência desse problema, o discurso de E1 pode estar sendo moldado por essa falta de diálogo entre resultados de pesquisa e a prática docente (problema que talvez atinja até mesmo o próprio ambiente formativo). Isso pode ser um reflexo do fato que, desde a formação inicial, os futuros professores não se tornam consumidores dos resultados de pesquisa.

Após, E1 compara a sua visão do ensino de Física na atualidade com o ensino recebido durante o período em que cursou o Ensino Médio, como se pode perceber no extrato a seguir.

Recorte 2

1. E1: Tinha 3 aulas por semana e deu pra ver tudo. Hoje não dá tempo pra mais
2. nada. [...] Eu não estudei nada disso. A professora trabalhava com bastante
3. exercícios e só deu Física Clássica. Eu nunca senti a falta desses assuntos
4. de Física Moderna. [...] Acho que tem que ser assim mesmo. ... Agora que eu

5. to estudando física é que eu vou ver isso. Da minha turma, quem foi pras
6. outras áreas não vai ter que estudar isso. [...] Eu acho bem interessante, mas
7. é pra graduação. Vamos ver como eu vou daqui pra frente, porque sempre
8. gostei da clássica e sempre fui bem em Física.

Como se pode perceber no discurso deste estudante, ele demonstra muita resistência em relação ao estudo de FMC no Ensino Médio, além de manifestar simpatia em relação a uma abordagem mais tradicional da Física, com muito trabalho concentrado em exercícios (linhas 2-3): “A professora trabalhava com bastante exercícios e só deu Física Clássica”. Ao argumentar que “Eu nunca senti a falta desses assuntos de Física Moderna” (linhas 3-4) passa a ideia de que o fato de a professora ter trabalhado essencialmente com a Física Clássica e ainda dando peso considerável às atividades com exercícios foi suficiente não só para abarcar essa área, mas para dar uma visão suficientemente completa de toda a Física. Essa carga axiológica depositada na aderência de E1 ao método citado da professora, incorporando essa voz ao próprio discurso, pode ser um indício de uma resistência à inovação. Além disso, a afirmação tácita ‘sempre ir bem em Física’ (dando destaque para a palavra “sempre”) pode estar relacionada apenas à aptidão em resolver problemas matemáticos da Física, como se aprender Física pudesse ser reduzido a instrumentalismos como esse, e novamente estabelecendo uma hierarquia valorativa que não privilegia o ensino de FMC (em especial a FQ) nas escolas.

Estudante E2:

Recorte 3

1. E2: Agora que to dando aula é que eu to vendo como era bom quando eu
2. estudava no Ensino Médio. A gente tinha mais aulas por semana e dava pra
3. ver toda a Física. Agora tem cada vez mais ENEM e vestibular pra cima da
4. gente e daí os alunos querem saber sobre relatividade, supercondutores e
5. outras coisas. [...] Tem coisas que eu até queria trabalhar com eles, mas é
6. que eu ainda não sei.

Esta estudante atribui a necessidade de inserir tópicos da Física do século XX aos exames de ingresso ao ensino superior e manifesta certa pré-disposição para a

abordagem dos mesmos em suas aulas, como no trecho “[...] Tem coisas que eu até queria trabalhar com eles, mas é que eu ainda não sei.” (linhas 5-6). Para esta aluna, existe uma justificativa imediata para estudá-los, visto que há uma cobrança externa e, ao mesmo tempo, desconhece algumas temáticas, o que pode ser um problema vinculado ao seu contexto formativo. Ela ainda parece incorporar na sua fala um dos desencontros totais entre a pesquisa na área de Ensino de Física e a prática docente, conforme concluído por Rezende e Ostermann (2005): com o vestibular e, atualmente, com o crescimento da influência do ENEM no que se refere ao ingresso nas universidades, a escola como instituição acaba por se curvar no sentido quase estrito de preparar especialmente para essas provas.

Em relação à trajetória acadêmica, esta estudante relaciona suas vivências à realidade encontrada nas salas de aula de modo que em seu discurso a escola se apresenta como uma instituição falida.

Recorte 4

1. E2: Eu sempre gostei de Física, ... desde o Ensino Médio. Quando fiquei sabendo
2. do curso, vim logo me inscrever e já aprendi um monte de coisa nova. Só que
3. daí tem a questão das aulas na escola que a gente se decepciona um pouco.
4. ... Tem aquele negócio de aliar a teoria e prática, só que na teoria tá legal,
5. mas na prática nas escolas é bem diferente. Às vezes penso que eu é que to
6. errada e que o jeito é fazer igual os outros profes. [...] Os alunos não tão nem
7. aí. Só querem fazer umas continhas e deu. ... Não querem interpretar nada.

A forma como E2 descreve a educação transmite a ideia de uma onda de conformismo, tanto por parte dos professores, “[...] o jeito é fazer igual os outros profes” (linha 6) quanto do lado dos estudantes de nível médio, “Os alunos não tão nem aí. Só querem fazer umas continhas e deu. ... Não querem interpretar nada.” (linhas 6-7). Essa fala pode estar novamente explicitando a dificuldade, citada anteriormente, da escola em aliar teoria (em geral frutos dos resultados de pesquisa) e prática, o grande tema que é estudado no artigo de Rezende e Ostermann (2005). Além disso, este discurso revela a visão de professor proletarizado e executor de tarefas, uma espécie de molde que pode ser veladamente imposto pelo cenário escolar.

Quando E2 afirma “às vezes penso que eu é que tô errada e que o jeito é fazer igual aos outros profes” (linhas 5-6) mostra o quanto a escola pode impor a manutenção da postura proletarizada do professor, indicando que essa imposição não necessariamente está personalizada na figura de algum gestor ou alguém que ocupe uma posição de poder dentro da comunidade escolar. A própria postura dos alunos, à qual E2 se refere (linhas 6-7) pode ser uma das forças importantes que praticamente impõe ao professor um molde que está longe de ser aquele que caracteriza um professor reflexivo, que norteie sua própria prática. Por outro lado, isso não impede que esse cenário seja alterado, desde que o professor esteja consciente dessa possibilidade.

Estudante E5:

Recorte 5

1. E5: Eu estudo Física porque gosto de Física, pois se dependesse da professora
2. que eu tive no Ensino Médio eu não tava aqui. Fui fazer o estágio de
3. observação na escola onde eu estudei e acabei acompanhando as aulas da
4. professora que me deu aula. ... Quase tive um treco. A professora ainda usa
5. o mesmo caderno que usava quando eu estudei lá. As aulas seguem sempre
6. a mesma sequência: chamada, correção dos exercícios da outra aula,
7. matéria nova e depois resolução de exercícios. É isso. [...] Ainda bem que eu
8. vim fazer Física porque chamar aquilo lá de Física é até uma ofensa. [...] Todas
9. aquelas contas não fazem o menor sentido.

Esta estudante faz duras críticas ao ensino de Física recebido quando cursou o Ensino Médio e demonstra que a vontade de estudar esta ciência não foi fruto de alguma prática positiva que tenha vivenciado em sua trajetória anterior. A forma como articula sua trajetória inicial com a busca pela licenciatura demonstra a preocupação com o ‘ensino formulístico’ que impregna a Física do nível médio, o que pode ser visto nos trechos “[...] Ainda bem que eu vim fazer Física” e “Todas aquelas contas não fazem o menor sentido.” (linhas 7-9). De certo modo, este posicionamento suscita a possibilidade de que E5 defenda um ensino mais centrado na abordagem de conceitos. Novamente é criticada a forma algorítmica da prática docente, parecendo comum nas escolas, e que parece ter marcado presença no contexto sociocultural de vários dos alunos objetos desta pesquisa.

Recorte 6

1. E5: Ultimamente eu tenho visto uns vídeos bem interessantes. Tinha um que
2. falava sobre o princípio da incerteza e tinha um que falava do experimento
3. do gato de Schrödinger. Esse eu não entendi direito. [...] É que nem tu disse:
4. já tem trabalhos que propõem levar essa Física mais atual ao Ensino Médio.
5. Só que pra isso eu acho que tem que saber bem primeiro e os professores
6. que tão aí hoje não sabem disso. Acho que tão ensinando a mesma Física
7. que eles aprenderam. Daí a educação não vai pra frente.

A procura por outras fontes de informação além dos livros didáticos por parte desta estudante revela a preocupação que tem com a sua formação e este aspecto é retomado ao final do discurso quando propõe que a Física ensinada continua sendo a mesma devido aos problemas existentes em nível de formação inicial. Esse discurso desloca a problemática do ensino da Física para o professor e sua formação, diferente de alguns dos estudantes que, até o momento, tinham como foco o desinteresse dos alunos. Porém, ao afirmar que os professores não sabem determinados conteúdos, ensinando a Física que aprenderam (linhas 6 e 7) e após arrematando a afirmação “Daí a educação não vai para frente” (linha 7), parece estar se alinhando ao discurso que atribui culpa ao professor pelos problemas educacionais, o que seria uma visão bastante limitada de toda a problemática.

Essa estudante retoma algum enunciado do pesquisador ao mencionar “É que nem tu disse ...” (linhas 3-4) demonstrando claramente que percebeu a intencionalidade da entrevista que estava sendo realizada e, de forma inevitável, isso acaba moldando seu discurso a fim de atender uma expectativa.

Estudante E6:

Recorte 7

1. E6: Eu sempre tive facilidade com a parte matemática, com a resolução de
2. equações. Fui muito bem nas disciplinas de cálculo aqui no curso. Quando
3. começa a falar em teoria, em conceito, eu fico até meio nervosa, porque
4. tenho dificuldade em interpretar as coisas se eu não ver a equação. [...] No
5. Ensino Médio eu sempre ia bem em Física, porque conseguia resolver quase

6. todos os cálculos. ... Quando aparecem questões conceituais aqui eu erro
7. bastante. Prefiro as contas.

A estudante E6 reconstrói sua trajetória acadêmica centrando-se na facilidade com o manuseio de expressões matemáticas e seu discurso deixa transparecer a associação que faz e ainda continua fazendo entre Física e seu tratamento matemático. Quando argumenta que “eu sempre ia bem em Física, porque conseguia resolver quase todos os cálculos” (linhas 5-6) e que “Quando aparecem questões conceituais aqui eu erro bastante. Prefiro as contas” (linhas 6-7) mostra que ainda carrega consigo a concepção de que o domínio de procedimentos matemáticos é a chave para a compreensão da Física.

As vozes que se originam do seu contexto formativo estão moldando seu discurso (por exemplo, quando afirma “Fui muito bem nas disciplinas de cálculo aqui no curso”, na linha 2). Essa é uma voz alinhada a uma perspectiva educacional instrumentalista, bastante comum em programas de formação inicial de professores de Física e de Ciências (ROSA e SCHNETZLER, 2003), que valoriza muito mais o domínio de procedimentos matemáticos e do formalismo do que a reflexão, que poderia até ampliar a Física para a esfera social, econômica, política, etc. (por exemplo, integrando-se ao currículo a perspectiva CTS).

Recorte 8

1. E6: Ensinar esses assuntos de Física Moderna eu acho que fica bem difícil
2. porque a matemática que descreve isso é complicada demais pros alunos
3. do Ensino Médio. É uma Física bem interessante, mas não sei se eles tão
4. preparados, além do mais isto quase nem aparece no vestibular. Acho que
5. nem os professores desses alunos tão preparados. Não sei se viram que
6. tinha que ensinar isso. [...] Bah, se eu tiver que estudar mais a teoria vou ter
7. que me superar, pois é como eu te disse, prefiro os cálculos.

Essa estudante reconhece a importância da FMC, mas considera que a sua inserção no Ensino Médio fica prejudicada pelo rigor da descrição matemática por trás da teoria. Como se pode observar, a abordagem fenomenológica parece ser algo ainda mais complexa para esta estudante, visto que a Física é considerada quase como uma extensão da Matemática. Além disso, a formação do professor até então, segundo E6,

não é algo que favoreça a abordagem da FMC no Ensino Médio. Esse posicionamento da estudante E6 corresponde, conforme já descrito, a uma das nossas preocupações e que norteou a organização dessa pesquisa. Novamente é citado o vestibular como um balizador das ações da escola, que acaba por se constituir em um espaço voltado a um ensino propedêutico.

Estudante E11:

Recorte 9

1. E11: Sempre gostei de Física e nunca tive problemas com ela, pelo menos até
2. agora. Tinha três aulas por semana e a professora dava aula do início ao fim.
3. Tinha bastante resolução de listas de exercícios e ela era muito atenciosa. O
4. que eu não gostava é que não tinha nenhuma experiência.

Essa estudante destaca uma prática bastante corriqueira nas aulas de Física, que é a resolução de exercícios, nos moldes de exercícios ‘de fixação’. Estes, muitas vezes, nada mais são do que repetidas substituições de dados numéricos em fórmulas e ao final dão a sensação de que houve alguma aprendizagem de fato. Outro elemento que reforça essa ‘aprendizagem’ mais mecânica é a falta de atividades experimentais.

Recorte 10

1. E11: De Física Moderna eu não tive nada no Ensino Médio. Agora que estou
2. dando aula, até quero ensinar alguma coisa assim pra meus alunos, mas
3. também não sei se vai ter como. ... Já tem um monte de conteúdo pra dar e
4. não sei se ia sobrar tempo. Só a Mecânica leva mais de um ano pra ver.
5. Ainda tem Termodinâmica, Óptica e Eletromagnetismo. É, não sei se
6. daria tempo.

É interessante observar nesse discurso uma ideia bastante difundida entre os professores, que é a hierarquização de conteúdos, privilegiando aqueles sob o guarda-chuva da Mecânica em detrimento dos demais (linhas 4-5). Apesar de a disciplina de Física Moderna desse curso de Licenciatura em Física ser o primeiro contato formal da aluna com a Física do século XX não se pode garantir que não tenha ocorrido algum contato anterior com esta área em outros contextos (leitura

de algum livro, reportagem ou da própria ementa da disciplina antes do seu início). Ao mencionar que “já tem um monte de conteúdo pra dar e não sei se ia sobrar tempo” (linhas 3-4) compartilha a visão de que um acréscimo de conteúdos é incompatível com a hierarquia pré-existente.

Estudante E12:

Recorte 11

1. E12: A gente resolvia os exercícios e depois o professor retomava sempre com
2. alguma aplicação, como no movimento de um carro, no funcionamento de um
3. motor, no consumo de energia em casa. Isso ajudava bastante, porque daí a
4. gente conseguia ver a Física e até se sentia mais animado pra aula. Eu ia
5. bem. Tinha facilidade em Matemática e daí me dava bem em Física, mas
6. sempre fui um curioso.

O estudante E12 afirma sentir-se à vontade com uma Física mais aplicada (linhas 2-4) que, conforme ele mesmo menciona, auxiliava na aprendizagem e pode-se inferir, satisfazia sua curiosidade (linha 7). Essa menção às aplicações da Física pode corresponder tanto a um processo onde se busca a contextualização dos conhecimentos quanto uma visão distorcida dessa ciência numa perspectiva instrumentalista. Essa nossa preocupação parece razoável quando os estudantes, normalmente, aliam um bom desempenho em Física à facilidade em Matemática.

Recorte 12

1. E12: Teve um outro professor aí que já falou nesse lance de inserir Física Moderna
2. [no Ensino Médio], mas eu acho que isso não dá certo. Hoje os alunos não
3. conseguem aprender nem essa Física que está aí, imagina Moderna. ... Acho
4. que o que dificulta é a matemática e a falta de aplicação. Isso não tá bem
5. difundido ainda né e sem enxergar essas coisas eu acho que é bem
6. complicado.

Quando E12 diz que a dificuldade em aprender Física Moderna pode ser em função da “matemática e a falta de aplicação” (linha 4) sua visão de Física enquanto ciência aplicada fica mais evidente. A visão acerca da natureza da ciência aparece como

um fator determinante para que esse estudante não acredite que possa haver aprendizagem sem “enxergar” (linha 5) aquilo que está sendo estudado. Isso é um aspecto interessante que diz respeito não só ao fato de não acreditar na possibilidade de ensinar FMC no Ensino Médio, mas também em relação à sua forma de aprender. Os sistemas quânticos possuem propriedades que não podem ser representadas classicamente e as tais “aplicações práticas” ocorrem em contextos diferentes do que E12 está acostumado, o que pode contribuir para um descrédito em relação à FMC.

Ao caracterizar o contexto sociocultural dos estudantes, verifica-se que compartilham da ausência da FMC na Física que estudaram durante o Ensino Médio. Mais do que isso, parecem compartilhar uma posição desfavorável ao estudo da FMC no Ensino Médio, apontando diversos fatores para tal: falta de preparo dos professores, insuficiência de carga horária, supervalorização de conteúdos da Física Clássica, pouca cobrança de conteúdos da FMC em sistemas de avaliação e pouca aplicabilidade da FMC.

Esses são fatores que precisam ser superados quando se pretende que haja uma efetiva inserção da FMC nos currículos escolares e por constituírem o contexto sociocultural dos estudantes, possivelmente seus discursos são orientados a partir destes posicionamentos. Não foram realizadas, durante a pesquisa em sala de aula, discussões relacionadas às alternativas para superação destes aspectos intervenientes no ensino de FMC, visto que o foco do trabalho não era esse. Tais discussões tiveram espaço em outra disciplina (Prática de Ensino de Física II) da matriz curricular do curso, ministrada pelo pesquisador, no mesmo semestre e para os mesmos alunos participantes da pesquisa.

6.4 Interações discursivas na segunda etapa da pesquisa

Primeiramente os estudantes, orientados pelo roteiro exploratório I (Apêndice E) exploraram o *software* a fim de reconhecer os dispositivos presentes e a função desempenhada por cada um simulando com o interferômetro operando em regime clássico. Esta atividade teve a duração de três horas-aula e contou com a intervenção do professor na forma de explicações acerca da operação do *software* e interpretação dos padrões de interferência observados. Essa aula teve o objetivo primordial de ajudar a criar um espaço de intersubjetividade entre professor e estudantes, por meio da

exploração da ferramenta mediacional (*software*) e seus recursos semióticos (parâmetros, representações pictóricas do IMZ, padrões de interferência e outros). Evidentemente o regime quântico será mais fácil de ser abordado se antes os estudantes forem confrontados com situações físicas em que, mediados pelo *software*, interagem com o interferômetro no regime clássico e exploram essas situações e os conceitos físicos nela envolvidos.

Na aula seguinte, a partir do roteiro exploratório II (Apêndice F) os estudantes passaram a operar o *software* em regime quântico – neste ponto, já conhecem razoavelmente o *software* e as diversas situações no regime clássico em que há interferência ou não. Esta atividade, com duração de três horas-aula, foi realizada em dois dias e possibilitou um primeiro contato dos estudantes com o fenômeno da interferência quântica. Inicialmente, a dualidade onda-partícula foi interpretada da forma como tradicionalmente aparece na literatura, ou seja, aspectos ondulatório ou corpuscular como sendo as únicas descrições possíveis para o fenômeno em estudo.

A sequência desta atividade aconteceu na segunda semana, na qual o professor introduziu os conceitos de visibilidade do padrão de interferência e distinguibilidade de caminho como estando associados a uma classe de fenômenos chamada fenômenos intermediários. Ainda seguindo o roteiro exploratório II os estudantes voltaram a realizar a simulação com o *software*, de modo que variando os coeficientes de reflexão e transmissão nos divisores de feixe pudessem visualizar a ocorrência dos fenômenos intermediários. Esta etapa da simulação foi conduzida em 2 dias e teve duração de 5 horas-aula, contando com intervenções do professor no sentido de auxiliar os alunos a interpretar os conceitos de visibilidade e distinguibilidade como centrais no estudo quantitativo da complementaridade onda-partícula, bem como no cálculo de probabilidades.

Na parte final da disciplina houve uma introdução à notação de Dirac, à álgebra dos operadores bem como a abordagem dos postulados da FQ. Esses temas foram explorados recorrendo-se aos dispositivos presentes no IVMZ e à medição com estes, a fim de contextualizar a abordagem de aspectos teóricos tornando-os menos abstratos.

Estes diálogos estão organizados de modo que as interações discursivas envolvendo as duplas de estudantes serão apresentadas ordenadamente em relação aos estudantes envolvidos, ou seja, primeiro todos os eventos da dupla de estudantes E1E2 e em seguida da dupla E5E6. Desta forma, pretende-se facilitar análises

posteriores no que diz respeito à forma como evolui o discurso dos estudantes no decorrer das atividades.

Interações discursivas envolvendo a dupla E1E2

Roteiro Exploratório I

Interação 1: Contexto situacional – No item 6 do roteiro exploratório I (Apêndice E), o interferômetro estava operando em regime clássico e os estudantes deveriam explicar a formação dos padrões de interferência nos anteparos a partir do cálculo das diferenças de caminho entre as diferentes componentes do feixe de luz *laser*. A figura 10 é uma representação dos padrões de interferência obtidos nos anteparos. O estudante E1 está em frente ao computador manipulando o *software* e E2 está ao seu lado, com o roteiro.

1. E2: Ele quer que a gente diga o que são estas figuras e como explica a formação
2. delas.
3. E1: É que nem no experimento da fenda dupla.
4. E2: Beleza.... É uma figura de interferência.
5. E1: Anota aí no roteiro então.
6. E2: Feito.
7. E1: Mas como que se forma?... No da óptica tinha só uma figura de interferência,
8. daí era por causa daquela diferença de caminho, lembra?
9. E2: Bah, agora complicou.
10. E1: Ferrou. ...Não tem nenhuma pista aí?
11. E2: Peraí. Aqui tá falando em mudança de fase da luz.
12. E1: Aqui, óh (...). Ele tá falando em diferença de caminho.
13. E2: Deixa eu desenhar aqui...
14. E1: Lembra que o outro semirrefletor também divide em duas partes.
15. E2: Tá. Meio lambda pra cada espelho.
16. E1: Pra os semirrefletor é um quarto de lambda.
17. E2: Vamos nesse aqui primeiro. Ele mandou chamar esse caminho de A.
18. E1: Tira esse um quarto daqui porque continua igual. Só muda se tem reflexão.
19. E2: É mesmo.
20. E1: Agora vai, oh. Chega com uma reflexão no detector 2 e com duas no
21. detector 1.
22. E2: Ah, tá. Então a parte que chega no detector 1 tem três quartos. ...A que
23. chega aqui no 2 tem meio lambda.
24. E1: Isso. O semirrefletor 2 transmitiu o que foi pro detector 2, daí não muda. Só

25. onde teve a reflexão. Tenta ver o outro agora.
26. E2: Tá. Caminho B, então. Um quarto, mais meio do espelho. ...Agora vai pra o
27. detector 1 e não muda. Pra o 2 tem mais um quarto de lambda.
28. E1: Agora tá certo. Soma isso.
29. E2: Dá três quartos de lambda pra o detector 1 e pra o 2 isso dá um lambda. ...
30. Ô professor! Tá certo isso?
31. P: Sim. A conta é essa. Como tu interpreta isso pra tentar explicar os padrões
32. nos anteparos?
33. E1: Eu pensei em falar na diferença de caminho. Igual à óptica.
34. P: Então tá. Essas diferenças de caminho que tu tem, na verdade, são das
35. mudanças de fase das reflexões. π corresponde a lambda sobre dois.
36. E2: Então dá pra falar em diferença de caminho aqui também?
37. E1: Claro, oh. As componentes que chegam no detector 1 sofreram as mesmas
38. mudanças de fase e daí chegam iguais. ...Quer dizer que não tem diferença
39. de caminho entre elas.
40. E2: Pro detector 2 tem diferença de meio lambda, que vai dar diferença de fase
41. de π entre as componentes.
42. E1: Então aqui dá interferência destrutiva e aqui é construtiva porque não tem
43. diferença de fase.
44. E2: Acho que é isso então. Vamos botar a resposta aqui.

Os estudantes deveriam concluir que ambas as componentes da luz que chegam no anteparo 1 sofreram o mesmo deslocamento de fase, que corresponde a uma diferença de caminho de $3\lambda/4$ em relação ao feixe inicial. Assim, como ambas as componentes estão em fase entre si, obtém-se uma região de interferência construtiva na parte central daquele anteparo. Para o anteparo 2, a região central apresenta interferência destrutiva porque há, entre as componentes que ali chegam, uma diferença de caminho que corresponde a $\lambda/2$, ou seja, estão defasadas entre si.

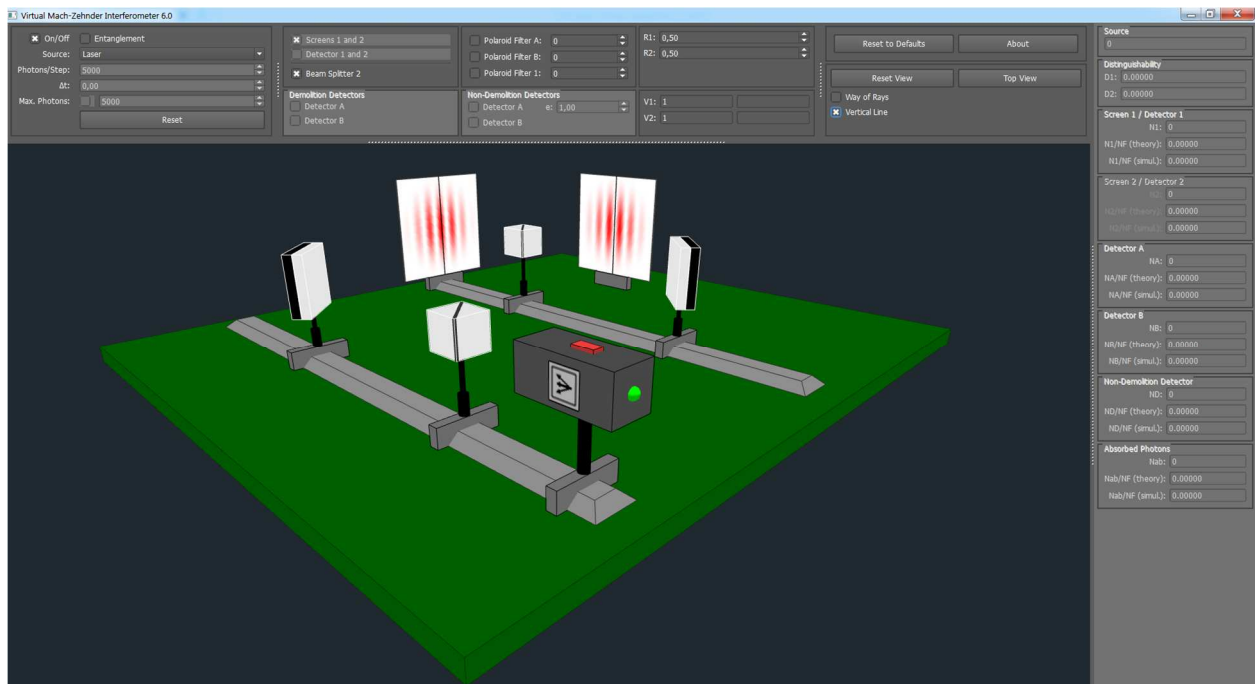


Figura 10 - Simulação do VMZ usando *laser* (ou seja, no regime clássico). Uma linha vertical foi traçada em cada anteparo para ajudar a perceber que os padrões de interferência nesses anteparos são invertidos entre si.

Este recorte no discurso inicia com E2 dirigindo-se ao colega com o enunciado “Ele quer que a gente diga o que são estas figuras e como explica a formação delas” (linhas 1-2), que permite identificar o papel mediador que assume o roteiro exploratório, com o qual os estudantes dialogam, de modo que a questão proposta consegue organizar a ação dos mesmos, assim como no enunciado “Aqui, óh (...). Ele tá falando em diferença de caminho.” (linha 12).

Além de promover a interação com e entre os estudantes, o roteiro exploratório suscita o uso de ferramentas culturais, por meio das quais se realiza a mediação e se organiza a ação dos indivíduos (VYGOTSKY, 1994). Quando E2 propõe “Deixa eu desenhar aqui” (linha 13) está fazendo o uso de ferramentas culturais (no caso, recursos semióticos) a fim de organizar a ação da dupla visando se apropriar do problema que é apresentado.

Como forma de responder à ordem implícita no roteiro exploratório e interagir com o mesmo, E1 faz uso de ferramentas culturais relativas à óptica ondulatória quando associa o padrão observado nos anteparos ao experimento da dupla fenda, no enunciado “É que nem no experimento da dupla fenda” (linha 3). A estudante E2 parece

compartilhar do mesmo ponto de vista do colega, uma vez que expressa concordância e complementa a análise do fenômeno, conforme o enunciado “Beleza.... É uma figura de interferência” (linha 4), reconhecendo os padrões nos anteparos.

É estabelecido um movimento dialógico entre os estudantes e o roteiro exploratório, visto que estes se permitem questionamentos mútuos e é possível perceber a interanimação de vozes que leva a uma construção coletiva de respostas para o que é perguntado, o que é corroborado pelos enunciados entre as linhas 14 até 26. Além disso, não se pode atribuir à resposta a um ou outro estudante, mas a ‘ambos os estudantes interagindo com o roteiro’, ou seja, aos agentes juntamente com o recurso mediacional, destacando o papel da cognição distribuída (PEREIRA, OSTERMANN e CAVALCANTI, 2012). O caráter dialógico fica evidente em um âmbito ainda mais amplo, quando E1 faz uso de ferramentas culturais que permitem identificar e explicar o fenômeno de interferência nos anteparos, que explicita um diálogo com um contexto temporal e espacialmente anterior àquele em que ocorreu essa situação didática.

Ao final deste diálogo, o estudante E1 procura assumir certa liderança frente à dupla, sintetizando a resposta ao questionamento apresentado e obtendo a concordância da colega, conforme os enunciados “Então aqui dá interferência destrutiva e aqui é construtiva porque não tem diferença de fase” (linhas 42-43) e “Acho que é isso então. Vamos botar a resposta aqui” (linha 44), respectivamente.

O professor utilizou uma abordagem mais interativa procurando auxiliar os estudantes na compreensão do fenômeno e não convencê-los sobre algo. O enunciado “Como tu interpreta isso pra tentar explicar os padrões nos anteparos?” (linhas 31-32), ao questionar os estudantes, permite que estes construam suas respostas a partir do conteúdo conceitual envolvido na simulação.

Interação 2: Contexto situacional – No item 7 do roteiro, os estudantes deviam retirar o segundo divisor de feixe e explicar o papel desempenhado por este dispositivo. A figura 11 ilustra os padrões obtidos nos anteparos para essa situação.

Aqui os estudantes deveriam observar que o segundo divisor de feixe é o dispositivo que faz a ‘subdivisão’ dos componentes da luz recebidos dos caminhos A e B do interferômetro, superpondo-os e produzindo a interferência. Sem esse dispositivo, o anteparo 1 recebe o componente da luz que se propaga pelo caminho B e no anteparo

2 chega a luz que se propaga pelo caminho A. Como não há superposição (seja de componentes em fase, ou defasadas), não há formação de padrão de interferência.

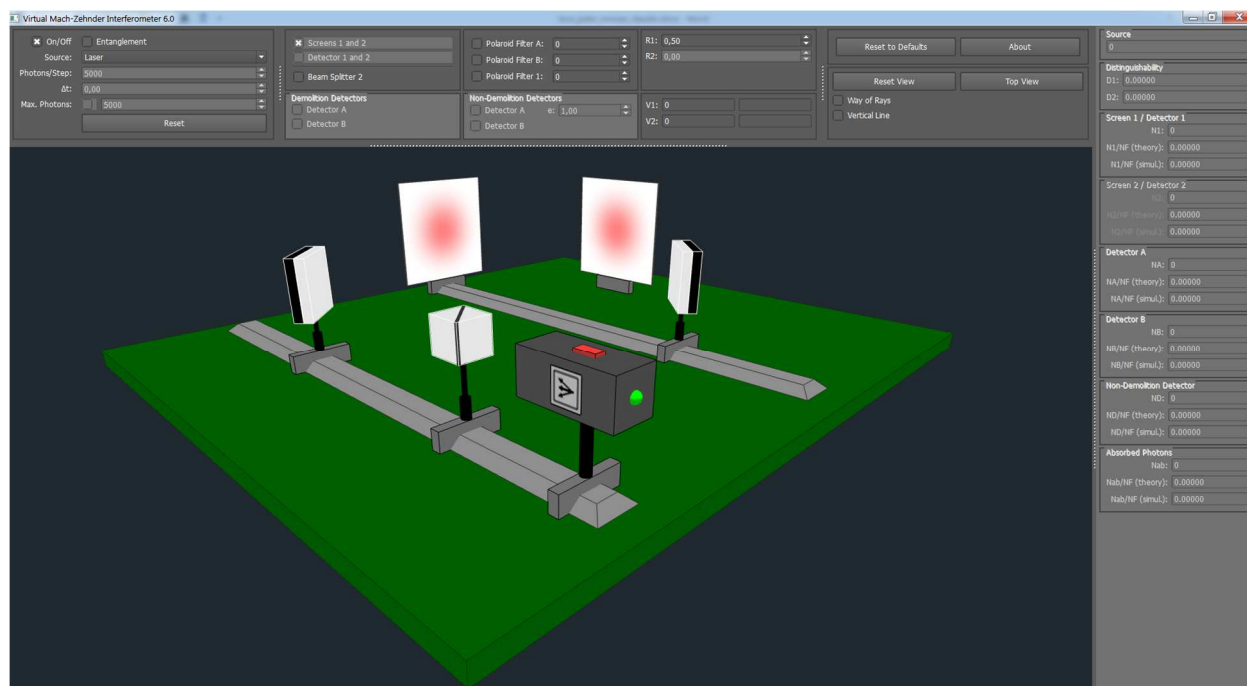


Figura 11 - Padrões obtidos com *laser* quando o segundo divisor de feixe é retirado, também no regime clássico.

1. E2: Aqui diz que tem que tirar o semirrefletor.
2. E1: Pronto, tá tirado.
3. E2: Tá tudo borrado ou eu que bebi um pouco?
4. E1: Tem a ver com a saída do segundo semirrefletor. Pega aquele teu rascunho
5. que tinha o desenho.
6. E2: Deixa eu arrumar isso aqui. Vou apagar ele.
7. E1: Vamos contar os λ antes da luz chegar nele.
8. E2: A parte que chega no detector 2 vem pelo caminho A e chega com meio
9. λ . A que chega no 1 vem pelo caminho B e tem três quartos de
10. λTá. E daí?
11. E1: Daí que agora não tem mais as quatro componentes. Agora só tem duas e
12. uma não tem nada a ver com a outra.
13. E2: Não dá pra falar em interferência então?
14. E1: A interferência já era. Antes tinha duas componentes da luz chegando em
15. cada anteparo e podia ser construtiva ou destrutiva.
16. E2: Vamos responder assim então?
17. E1: A moral desse semirrefletor é que ele faz *a/*. Como que é mesmo que o

18. professor tinha falado?
19. E2: A superposição dos componentes da luz.
20. E1: Isso. É ele que divide os componentes de novo e faz eles se somarem
21. construtiva ou destrutiva.

O estudante E1 inicia o diálogo interagindo com o roteiro exploratório, uma vez que, ao responder “Pronto, tá tirado” (linha 2) não está atendendo a uma ordem vinda da colega, mas respondendo ao roteiro. Este estudante, assim como no diálogo 1 (linhas 42-43) demonstra desenvoltura em selecionar ferramentas culturais adequadas, o que está evidenciado no enunciado “Tem a ver com a saída do segundo semirrefletor” (linhas 4-5). É perceptível a sua capacidade de identificar relações entre os dispositivos no interferômetro e a participação dos mesmos na ocorrência do fenômeno de interferência. A sua desenvoltura quanto ao uso de ferramentas culturais que ajudam a organizar melhor as ações da dupla no IVMZ aparece quando, por exemplo, ele solicita “Pega aquele teu rascunho que tinha o desenho” (linhas 4-5).

Em relação a E2, suas considerações recaem sobre os procedimentos matemáticos usados para explicar a função do dispositivo retirado do interferômetro. Neste sentido, o uso das ferramentas culturais está mais voltado à organização dos seus cálculos do que a uma proposição teórica (os recursos semióticos dos quais lança mão são signos matemáticos, além dos enunciados). No diálogo aqui analisado, essa facilidade em lidar com aspectos da matemática vem à tona no enunciado “A parte que chega no detector 2 vem pelo caminho A e chega com meio λ . A que chega no 1 vem pelo caminho B e tem três quartos de λTá. E daí?” (linhas 8-10). O procedimento matemático foi realizado corretamente, mas ela não parece se preocupar em explicitar a conexão deste com a fenomenologia para descrever a ausência dos padrões de interferência nos anteparos.

No enunciado “A superposição dos componentes da luz.” (linha 19) E2 não está elaborando conclusões, mas apenas repetindo uma fala do professor que ocorreu em algum momento, visto que o enunciado anterior de E1 corrobora esta afirmação, “Como que é mesmo que o professor tinha falado?” (linhas 17-18). Nesse caso, a interanimação de vozes, retomando um enunciado do professor, propicia a síntese de uma resposta: “Isso. É ele que divide os componentes de novo e faz eles se somarem construtiva ou destrutiva” (linhas 20-21).

Interação 3: Contexto situacional – Os estudantes, nas questões 8 e 9, deveriam explicar como a presença de filtros polaroides alterava os padrões nos anteparos, sem o segundo divisor de feixe (BS_2), inicialmente com apenas um polaroide (no caminho A, a 45 graus) e em seguida com dois polaroides (acréscimo de um polaroide a 90 graus no caminho B). As figuras 12 e 13 representam as configurações obtidas pelos estudantes bem como os padrões nos anteparos.

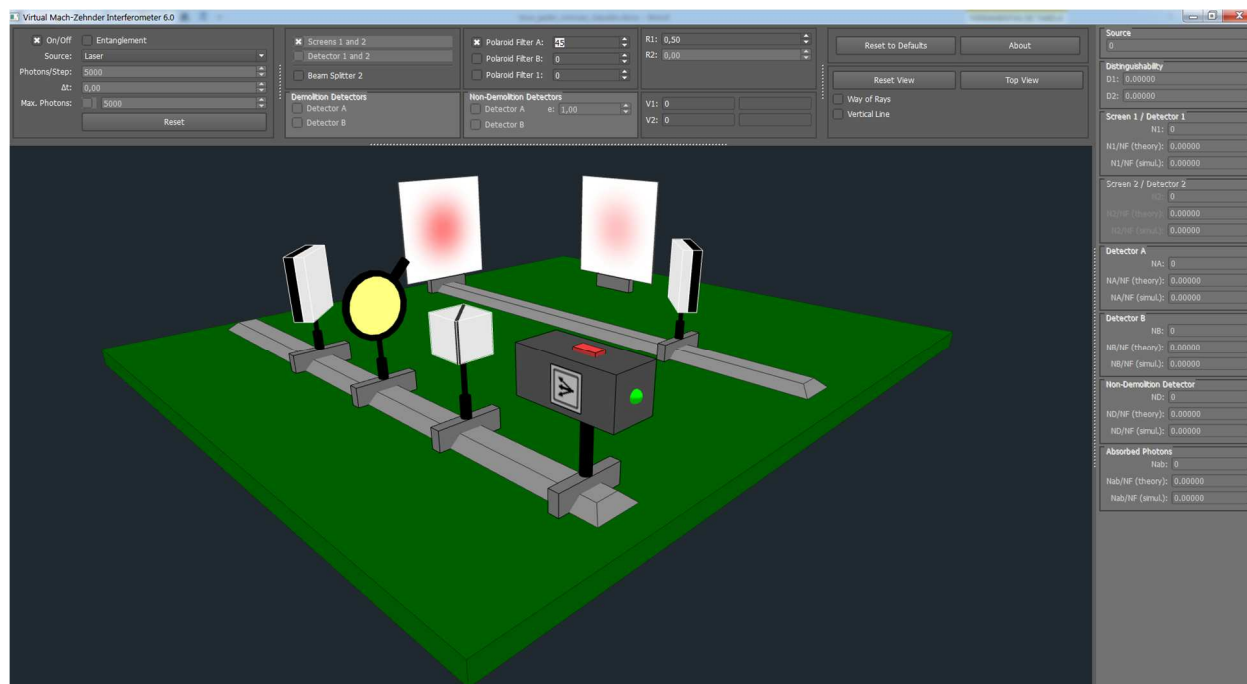


Figura 12: Inserção de um filtro polaroide a 45 graus no braço A. No anteparo 2 a intensidade passa a ser menor, pois há absorção de energia da onda pelo polaroide.

As explicações dos estudantes deveriam envolver a absorção dos componentes da luz que se propagam pelos caminhos A (absorção parcial) e B (absorção total) em função do ângulo de polarização e constatarem que a fonte emite luz com polarização horizontal, além de relacionarem a absorção de parte da luz com a formação de figuras com menor intensidade. Devido à ausência do segundo divisor de feixe, o anteparo 1 recebe luz proveniente do caminho B e a luz que chega no anteparo 2 é proveniente do caminho A. Por isso, a absorção parcial da luz no caminho A resulta em um padrão com menor intensidade no anteparo 2. O polaroide a 90 graus, por sua vez, absorve completamente a luz que se propaga pelo caminho B, de modo que resta apenas a componente da luz que se propagou pelo caminho A e que chega ao anteparo 2. Daí conclui-se que a fonte emite na polarização horizontal.

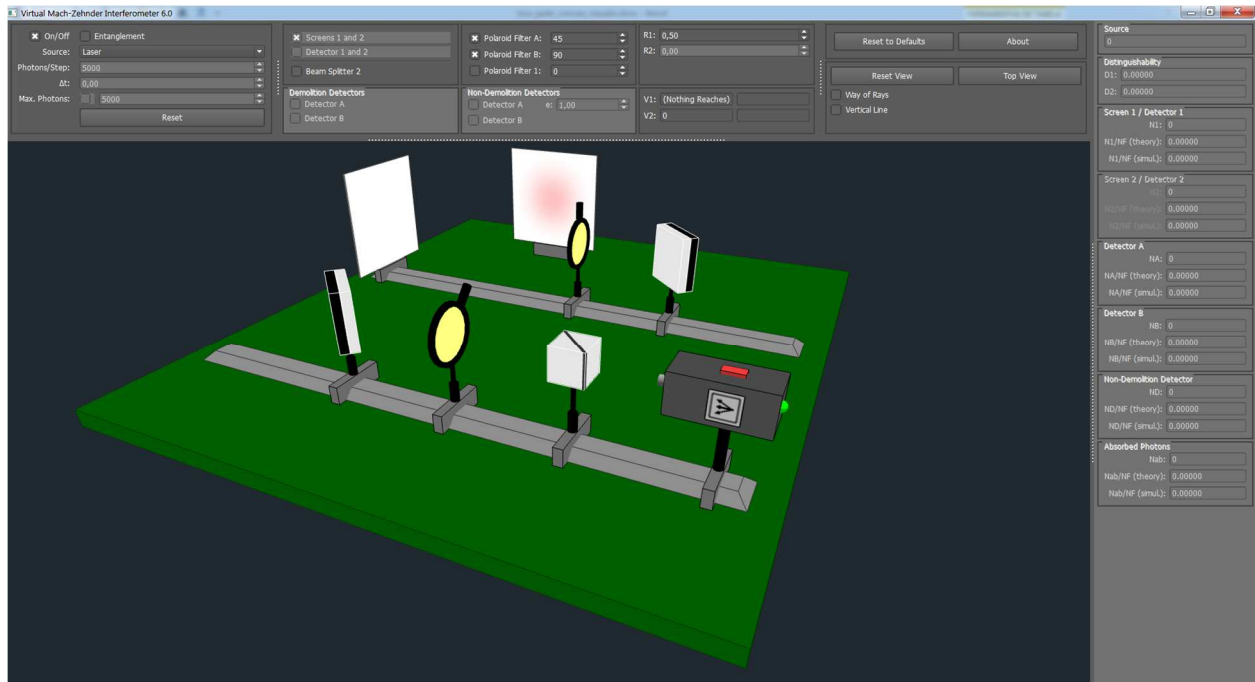


Figura 13: Padrões nos anteparos com um filtro polaroide no caminho A (45 graus) e um no caminho B (90 graus)

Com o polaroide orientado a 45 graus no braço A:

1. E1: Com 45 fica a mesma coisa, só que tá mais fraco aqui [anteparo 2].
2. E2: Será que tem que fazer aquela contagem das fases de novo pra explicar isso?
3. E1: Acho que não, porque é um polaroide.
4. E2: Sim, mas e daí?
5. E1: Daí que polaroide só polariza.
6. E2: Deixa passar, ... mas seleciona!
7. E1: Isso. Tá mais fraco aqui [anteparo 2] porque tá chegando menos luz.
8. E2: Pois é, mas não vai mudar a fase quando polarizar?
9. E1: Não. Só muda quando reflete. Aqui não tem nada a ver com mudança de fase.
10. E2: Tá. Vou escrever isso então. Vamos lá ... [estudante colocam os enunciados
11. de E1 como respostas]

Após acrescentar o polaroide orientado a 90 graus no braço B:

12. E2: Sumiu!
13. E1: É que o outro [polaroide] tá polarizando também.
14. E2: Tá absorvendo!
15. E1: Isso. Ele polariza a 90 e esse aqui [polaroide no caminho A] polariza a 45
16. [graus].
17. E2: Pois é, mas não pode ser só essa explicação, senão não ia sumir a figura. Só

18. ia ficar mais fraquinha.
19. E1: Saquei! ... Olha aqui óh! Só com o polaroide de 90 a figura também some aqui
20. [anteparo 1]. Fica mais forte no outro [anteparo 2].
21. E2: Legal! Tira o de 45 e depois coloca de novo. ... Vou colocar aqui.
22. E1: Sim, o de 45 só serve pra enfraquecer um pouco a figura.
23. E2: Ele tá polarizando também, só que o de 90 polariza mais porque tem um
24. ângulo [de polarização] maior.
25. E1: Isso!

O estudante E1, por estar manipulando o *software* acaba dirigindo as ações da dupla, visto que toma a liberdade de testar outras configurações com os polaroides (linha 19). A dúvida que existia em relação ao papel do polaroide colocado no caminho B (orientado a 90 graus) é solucionada a partir dos enunciados de E1 (linhas 19-20) quando este observa que tal polaroide absorve completamente a luz. Se os estudantes comparassem de forma mais cuidadosa os padrões obtidos e levassem adiante a noção de polarização que demonstraram compartilhar, teriam condições de concluir que a polarização da luz emitida era horizontal. A figura 14 ilustra o que foi observado pelos estudantes quando E1 (linha 19) deixou apenas o polaroide orientado a 90 graus no interferômetro.

O estudante E1 não utilizou uma linguagem precisa para se comunicar (linha 22) e este enunciado parece ter induzido uma compreensão equivocada por parte de E2 (linhas 23-24) quando esta propõe que o polaroide orientado a 90 graus “polariza mais porque tem um ângulo [de polarização] maior”. Isso parece ter um significado claro para ambos, que dão a questão por encerrada e acabam não discutindo a variação da intensidade da luz que chega nos anteparos quando se compara os resultados obtidos com apenas o polaroide orientado a 45 graus e com o acréscimo do polaroide a 90 graus.

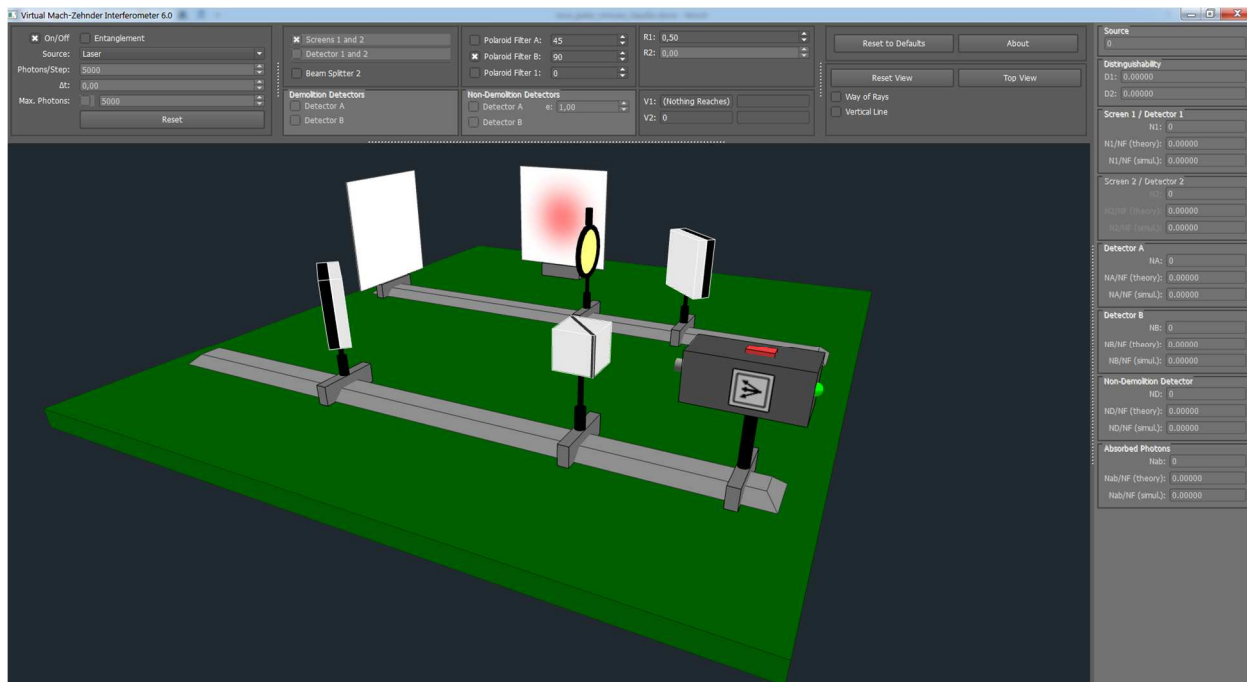


Figura 14: Inserção de um polaroide a 90 graus no braço B. Nesse caso, toda a energia da onda é absorvida e nada incide no anteparo 1.

Interação 4: Contexto situacional – Os estudantes recolocaram o segundo divisor de feixe no interferômetro e passaram a testar diversas configurações de polaroides. O propósito era que compreendessem o papel destes dispositivos no interferômetro e sua influência sobre os padrões obtidos nos anteparos.

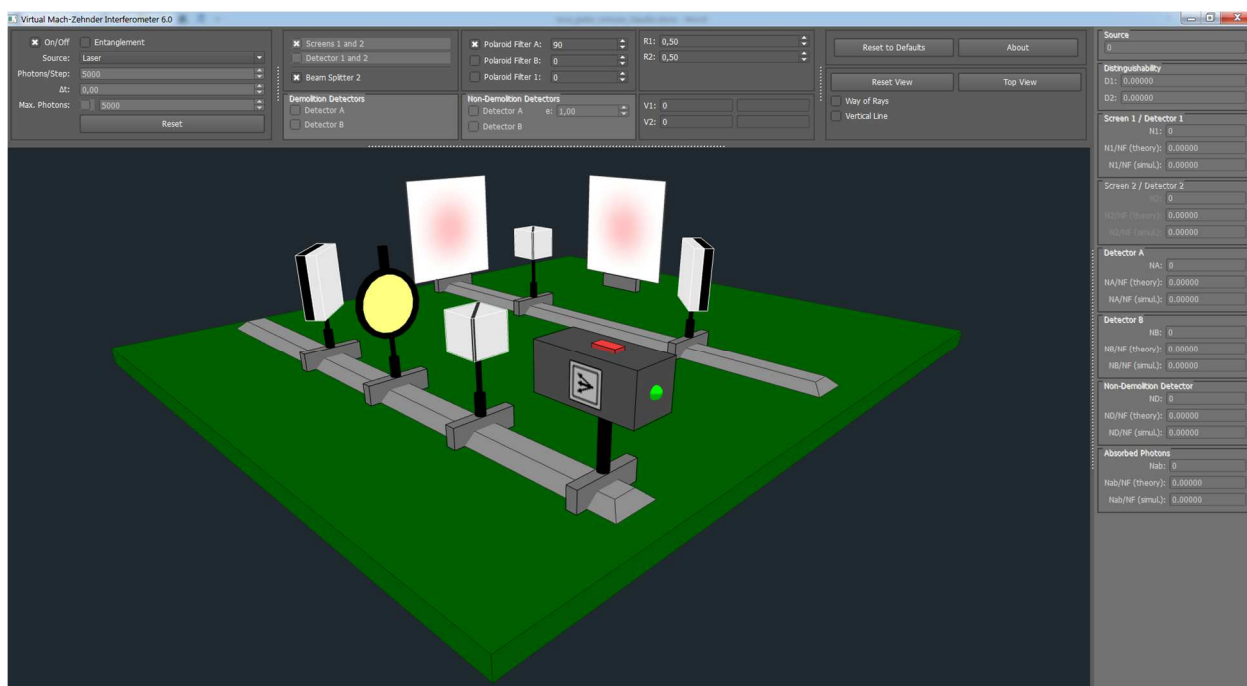


Figura 15: Polaroide orientado a 90 graus no braço A, com o segundo divisor de feixe presente. Nesse caso, a luz só incide no anteparo 1, sem produzir interferência.

A partir da constatação de que o feixe de luz *laser* emitido tem polarização horizontal, o arranjo da figura 15 possibilita aos estudantes a verificação de que somente a luz que provém do braço B do interferômetro chega aos anteparos. Nessa situação não há superposição que acarrete interferência nos anteparos, visto que o segundo divisor de feixe apenas divide a componente da luz recebida a partir do braço B.

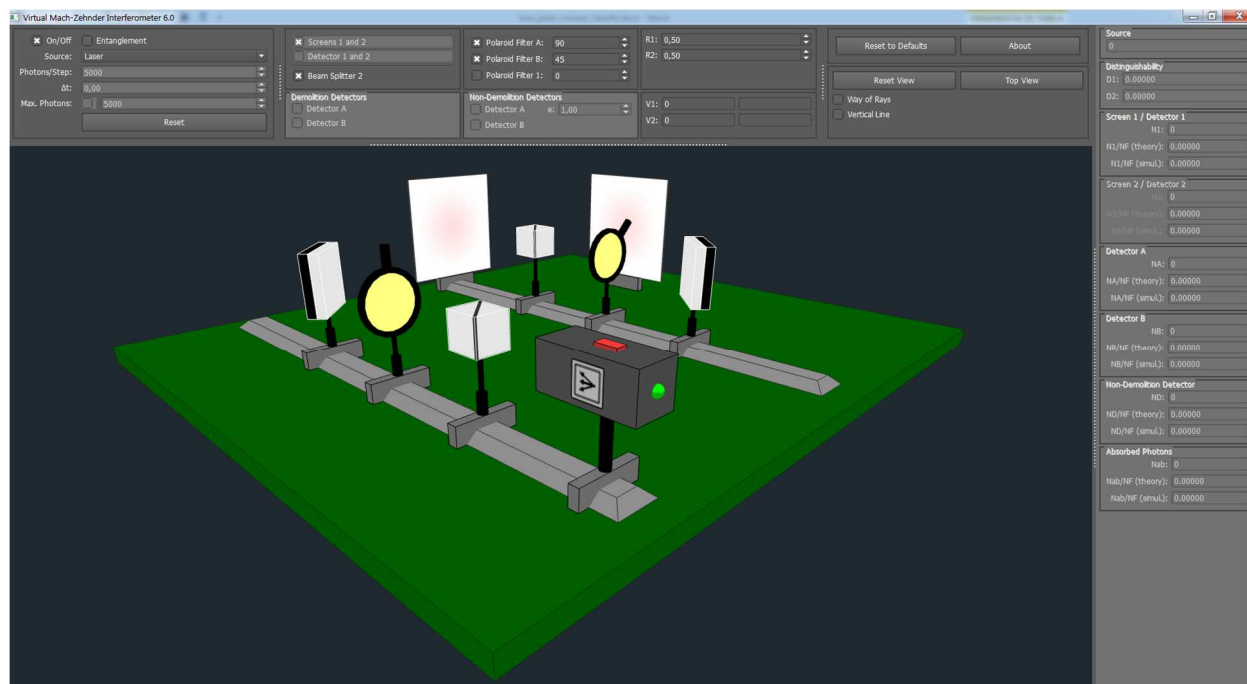


Figura 16: Polaroides orientados a 90 graus no braço A e a 45 graus no braço B, com o segundo divisor de feixe presente.

Mantendo-se o polaroide orientado a 90 graus no braço A e colocando um polaroide a 45 graus no braço B, conforme a figura 16, os estudantes poderão observar a redução na intensidade da luz nos anteparos. Isso ocorre porque a luz que chega aos anteparos (vinda pelo braço B) terá sua intensidade reduzida (lei de Malus). A componente transmitida será polarizada a 45 graus.

Na figura 17 observa-se o comportamento dos padrões de interferência nos anteparos com um polaroide orientado a 135 graus no braço A. Este padrão é idêntico ao que seria obtido caso este polaroide estivesse a 45 graus. Neste caso, a luz é parcialmente absorvida (em metade da intensidade), assumindo uma direção de polarização a 135 graus no braço A. Como uma parte da luz foi absorvida, os padrões de interferência nos anteparos diminuem de intensidade, diminuindo também a visibilidade do padrão de interferência (em cada anteparo haverá interferência entre duas

ondas com polarizações distintas – com ângulo de 45 graus entre elas – além de possuírem intensidades distintas).

Quando um polaroide orientado a 45 graus é colocado no braço B, conforme solicitado aos estudantes no roteiro exploratório, obtém-se uma configuração com polaroides cruzados. Assim, a luz que chega no segundo divisor de feixe vinda pelo braço B está polarizada a 45 graus. O resultado é que não há formação de padrão de interferência entre ambas as componentes, conforme representado na figura 18.

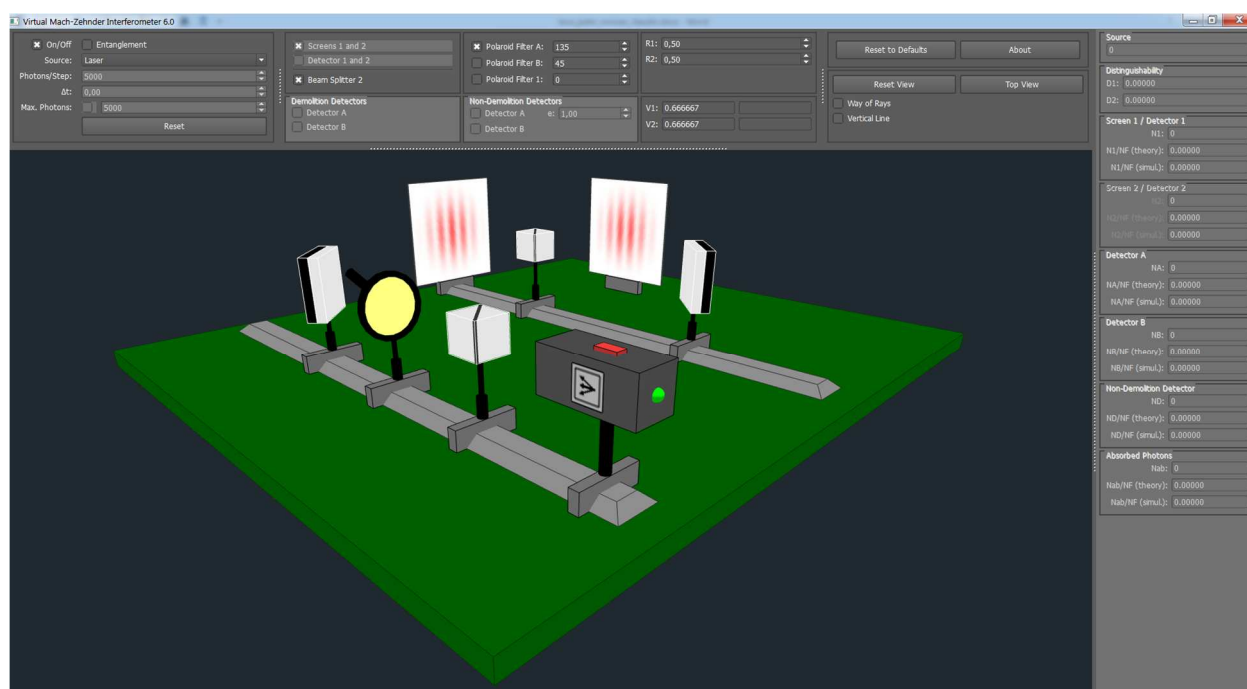


Figura 17: Polaroide orientado a 135 graus no caminho A. Nota-se que há interferência em ambos os anteparos, mas com intensidade e visibilidades (aproximadamente de 0,67 em cada anteparo) reduzidas.

Finalmente, quando se coloca um terceiro polaroide, orientado a 90 graus, entre o segundo divisor de feixe e o anteparo 1 (*Polaroid Filter 1*), recupera-se o padrão de interferência naquele anteparo (ver figura 19). Isso ocorre porque o segundo divisor de feixe está superpondo a componente da luz polarizada a 135 graus com a componente polarizada a 45 graus. Estas duas componentes, ao incidirem sobre o terceiro filtro polaroide assumem uma direção de polarização a 90 graus, fazendo com que o campo elétrico oscile na mesma direção (mas em sentidos opostos) recuperando o padrão de interferência no anteparo 1 invertido e com menor intensidade (a luz foi parcialmente absorvida pelos polaroides). Como uma parte da luz é absorvida nos polaroides, o padrão de interferência obtido tem uma intensidade menor. Observe que no anteparo 2

isso não acontece, pois as componentes da luz que chega até ele têm direções de polarização perpendiculares.

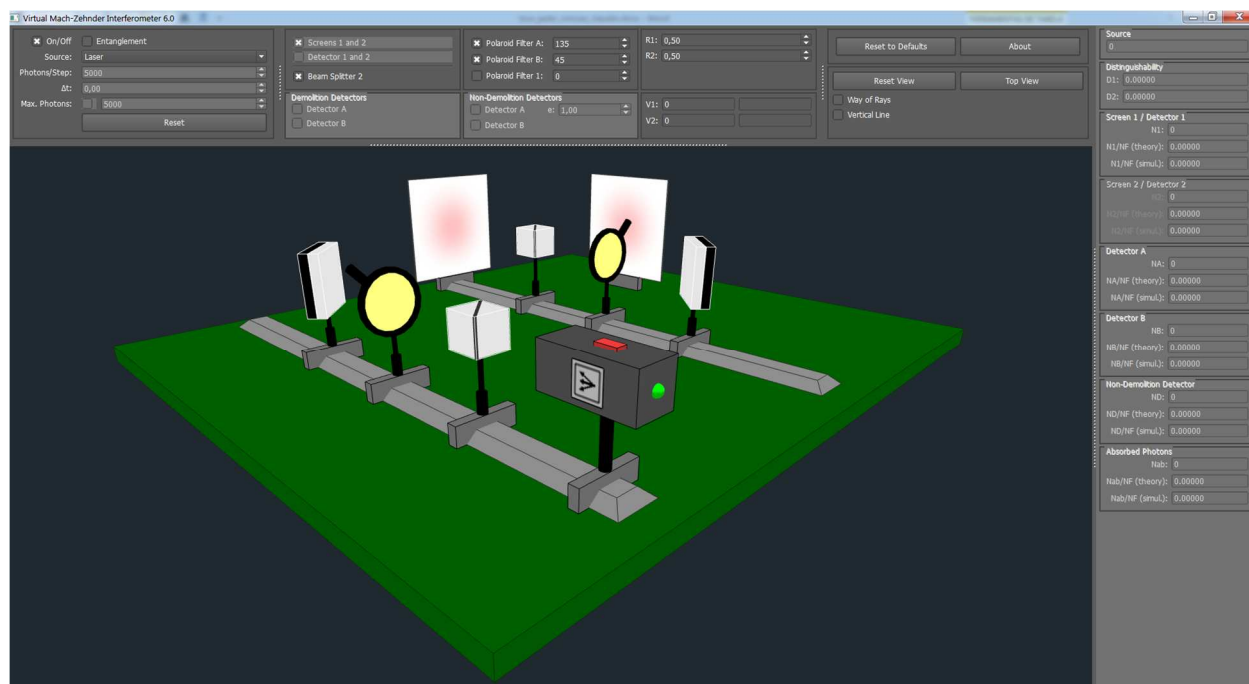


Figura 18 - Polaroides cruzados nos caminhos A e B. Como as componentes transmitidas agora possuem polarizações ortogonais entre si (o campo elétrico da componente A oscila em um plano perpendicular ao da componente B), não é possível a formação de máximos e mínimos nos anteparos.

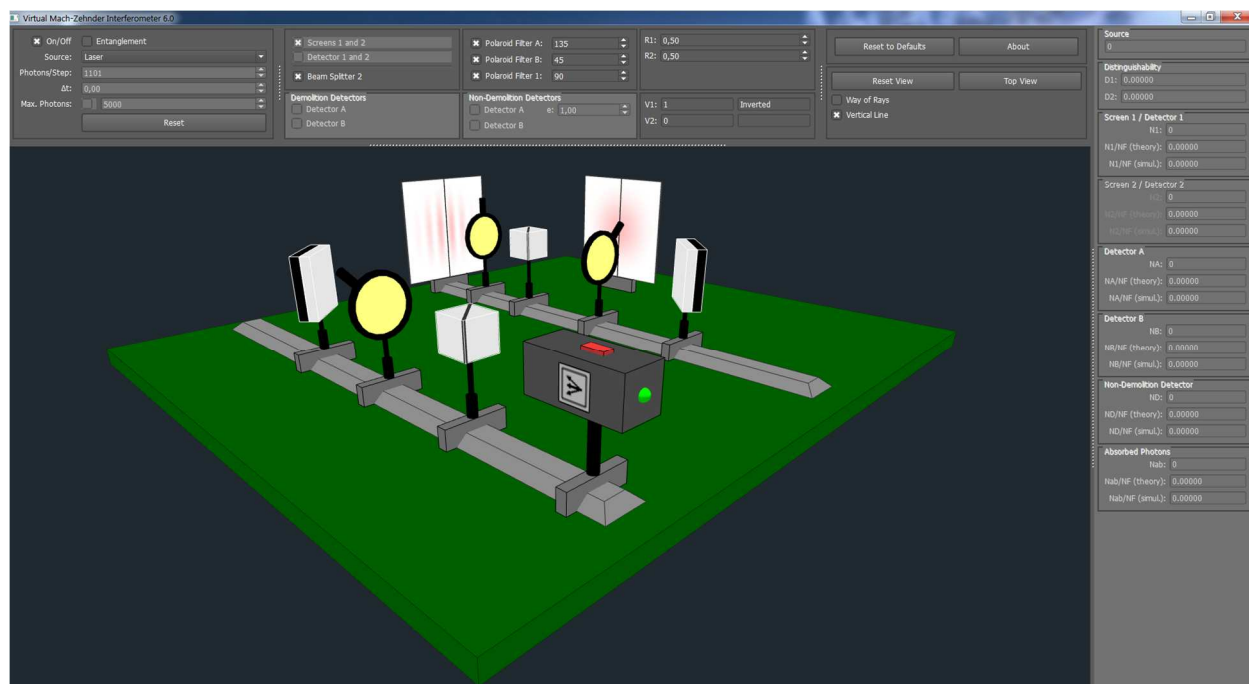


Figura 19: Reconstrução do padrão de interferência com a inserção do terceiro polaroide, com o eixo de transmissão orientado a 90 graus. Note que o padrão de interferência inverte no anteparo 1, passando a ter um mínimo na região central. Essa é uma versão clássica do famoso *apagador quântico*. A versão quântica também pode ser trabalhada no *software*.

Com o polaroide orientado a 90 graus no braço A:

1. E2: Como que agora chega [a luz] nos dois anteparos?
2. E1: É que agora tem esse divisor aqui. Daí ela joga luz pros dois lados.
3. E2: Isso tá. Mas de onde que tá vindo a luz agora?
4. E1: Dos dois lados [braços do interferômetro].
5. E2: Mas o de 90 não deixava passar nada lembra? Quanto maior o ângulo mais
6. ele polariza.
7. [Silêncio].
8. E2: Por que tu tá voltando?
9. E1: Cara, eu acho que tá tudo errado. ... Não é isso. ... Olha aqui óh. Quando a
10. gente tira o divisor [segundo divisor de feixe] tu viu que some a figura né?
11. E2: Isso. E só chega luz no 1 [anteparo 1].
12. E1: Então, antes esse polaroide tava no outro lado [braço B] e daí só chegava luz
13. no 2 [anteparo 2].
14. E2: Bah, é mesmo!
15. E1: O de 90 não deixa passar nada. Mas a 180 passava tudo. Sacou, né?
16. E2: Sim, por causa do ângulo.
17. E1: Só se a luz tá na horizontal então.
18. E2: Bah:..
19. E1: Agora com o divisor no lugar óh. ... Só vai a luz que passa pelo outro lado
20. [braço B].
21. E2: Daí o divisor divide pras duas plaquinhas [anteparos].

A estudante E2 (linhas 3 e 5) dá uma contribuição muito importante para a dupla. Mesmo com uma noção equivocada sobre a atuação dos filtros polaroides, mas que parece fazer sentido para si, associando um aumento na absorção da luz em função do aumento do ângulo do eixo de transmissão do polaroide, ela consegue questionar E1, de tal modo que o mesmo precisa repensar completamente suas ações. O desequilíbrio provocado por E2 sobre a forma de pensar de E1 requer toda uma revisão dos procedimentos realizados até aquele momento (linhas 7-10). Por mais que E2 não tenha a resposta para o questionamento que apresentou, ela contribui com a dupla de outra forma (linhas 11 e 15), auxiliando a (re)interpretar as figuras nos anteparos.

O fato de E1 ter sugerido que a luz emitida pela fonte possa ter polarização horizontal (linha 16) somente foi possível a partir do questionamento de E2. Observa-se aqui o caráter exploratório do roteiro e da simulação, uma que vez não há nenhum

questionamento no roteiro em relação a qual dos braços do interferômetro transmite ou absorve a luz ou sobre a polarização da luz emitida pela fonte.

Com o polaroide a 90 graus no braço A e o polaroide a 45 graus no braço B:

21. E2: Bota o de 45 agora aqui [braço B].
22. E1: Daí enfraquece. Viu? ... Então a gente tá certo agora.
23. E2: O de 90 não deixa passar nada e o de 45 só um pouco.
24. E1: Isso. Daí só chega luz que vem por esse lado [braço B] e como uma parte foi
25. absorvida o desenho fica mais fraco.
26. E2: Ok!

Apesar de os estudantes mencionarem a polarização da luz na direção horizontal, isso aparece muito mais como uma condição do tipo “isso ocorre somente se aquilo for verdade” do que como uma conclusão da dupla. A polarização continua sendo tratada a partir do resultado da absorção de uma parcela da luz (linha 22 e 24-25). Os estudantes conseguem se entender e prosseguem na atividade, apesar de não se referirem, como antes, de forma explícita à direção de polarização.

Alteração para 135 graus na orientação do polaroide no braço A:

27. E2: Agora troca o de 90 por 135. ... Hum::.
28. E1: Fica um pouquinho mais forte né?
29. E2: Parece que sim. O de 135 não ataca toda a luz então.
30. E1: É. Ele deixa passar um pouco e o de 45 também. Daí soma as duas e fica um
31. pouquinho mais forte em cada um [dos anteparos].
32. E2: É.
33. E1: Aquele lance lá de quanto maior o ângulo não tá certo então. A gente
34. aumentou mais o ângulo e polarizou menos agora.
35. [E2 interage com o pesquisador; inaudível]
36. E2: O professor disse que não precisa corrigir aqui [no roteiro]
37. E1: O polaroide seleciona alguns ângulos.
38. E2: Vou colocar aqui.

A polarização continua sendo tratada como uma alusão à absorção da luz (linhas 29 e 30), que não mais segue uma relação direta com o ângulo do eixo de transmissão

(linhas 33-34). Os estudantes partiram de uma interpretação equivocada e fazem sucessivas aproximações que lhes permitem elaborar suas explicações de modo um pouco mais preciso (linha 37): “O polaroide seleciona alguns ângulos”.

Com os três polaroides:

39. E1: Meu Deus... Agora pegou pesado.
40. E2: Como que pode aparecer a figura de novo?
41. E1: Aqui só passa quem tá oscilando em 135 graus e no caminho B só quem tá a
42. 45 graus.
43. E2: Que doidera!
44. E1: O padrão é destruído e depois reconstruído!
45. E2: Ô professor!
46. E1: Não chama que eu acho que já sei como faz. ...Óh!
47. E1: É o de 90 que faz mudar.
48. E2: Tá, mas ainda não sabemos a resposta.
49. E1: O de 90 faz uma superposição.
50. E2: Polaroides não fazem superposição. Só seleciona e deixa passar.
51. E1: Ficou confuso. ... Deixa eu escrever melhor. [E1 pegou o roteiro e começou a
52. escrever].
53. E2: O que tu tá escrevendo aí?
54. E1: Isso que tu falou.
55. E2: Tá. Então bota que o polaroide de 90 tá pegando as ondas superpostas pelo
56. segundo semirrefletor e selecionado só a parte que tá em 90 graus.
57. E1: Mas não tem ninguém em 90 graus. ... No caminho A passa em 135 e no B
58. passa em 45.
59. E2: O semirrefletor joga todo mundo pra 90 e o polaroide deixa passar.
60. E1: Ahan::!

Expressões como “Agora pegou pesado” (linha 39) e “Que doidera” (linha 43) revelam um caráter um tanto enigmático com que os estudantes percebem os resultados nos anteparos.

Pela primeira vez a estudante E2 recorre a um termo próprio do fenômeno de interferência para dar uma explicação completa do fenômeno observado. No enunciado “Então bota que o polaroide de 90 tá pegando as ondas superpostas pelo segundo semirrefletor e selecionado só a parte que tá em 90 graus.” (linhas 55-56), E2 retoma um

enunciado anterior, “Polaroide não faz superposição. Só seleciona e deixa passar.” (linha 49). Ao tomar posse da fala de E1, “O de 90 faz uma superposição” (linha 48) consegue articular o termo ‘superposição’, próprio do fenômeno de interferência, na forma de uma proposição, que tem um caráter explicativo para E1.

Considerando a forma como evoluem as interações entre os estudantes, novamente observa-se o caráter dialógico do discurso nas posturas responsivas mútuas de E1 e E2 frente aos enunciados construídos, visto que cada proposição contida em um enunciado levava a outro enunciado, novamente ocorrendo a interanimação de vozes na negociação de significados. Essas vozes não são veiculadas apenas por E1 e E2, pois eles as incorporam de livros didáticos, ex-professores, textos explicativos, etc.

Roteiro Exploratório II (Apêndice F)

Interação 5: Contexto situacional – A estudante E2 está sentada em frente ao computador e E1 está com o roteiro exploratório. O IVMZ está operando em regime quântico e os anteparos foram substituídos por detectores. Na questão 4 os estudantes devem explicar o padrão de detecções nos detectores e, na questão 5, sobre a possibilidade de inferir o caminho tomado por um fóton qualquer e explicar a natureza do fenômeno (ondulatório ou corpuscular).

Os estudantes deveriam constatar, a partir das contagens na janela “*Photon Counters*” ou de uma luz indicativa em cada detector, que as detecções ocorrem de forma individual, ou seja, apenas um fóton de cada vez e que somente o detector D_1 acusa as detecções (ver figura 20). Isso ocorre porque a fonte está emitindo um feixe aproximadamente colimado de fótons e os detectores estão localizados em uma posição que corresponde à região central dos anteparos que foram utilizados anteriormente. Assim, como na região central do anteparo 1 havia um máximo de interferência (interferência construtiva), essa região deve indicar a presença de fótons quando a simulação é realizada em regime quântico. A parte central do anteparo 2 era uma região de interferência destrutiva, logo, o detector D_2 não deverá acusar a detecção de fótons, pois naquela região a intensidade é nula e, portanto, também o é a probabilidade de detectar fótons.

Esta configuração da simulação (em regime quântico e com os divisores de feixe balanceados) não permite obter informação sobre o caminho associado a qualquer um

dos fótons que é detectado. Em função das detecções ocorrerem somente em D_1 (essa é uma característica do fenômeno de interferência), verifica-se a natureza ondulatória do fenômeno observado com os fótons nessa configuração do IVMZ.

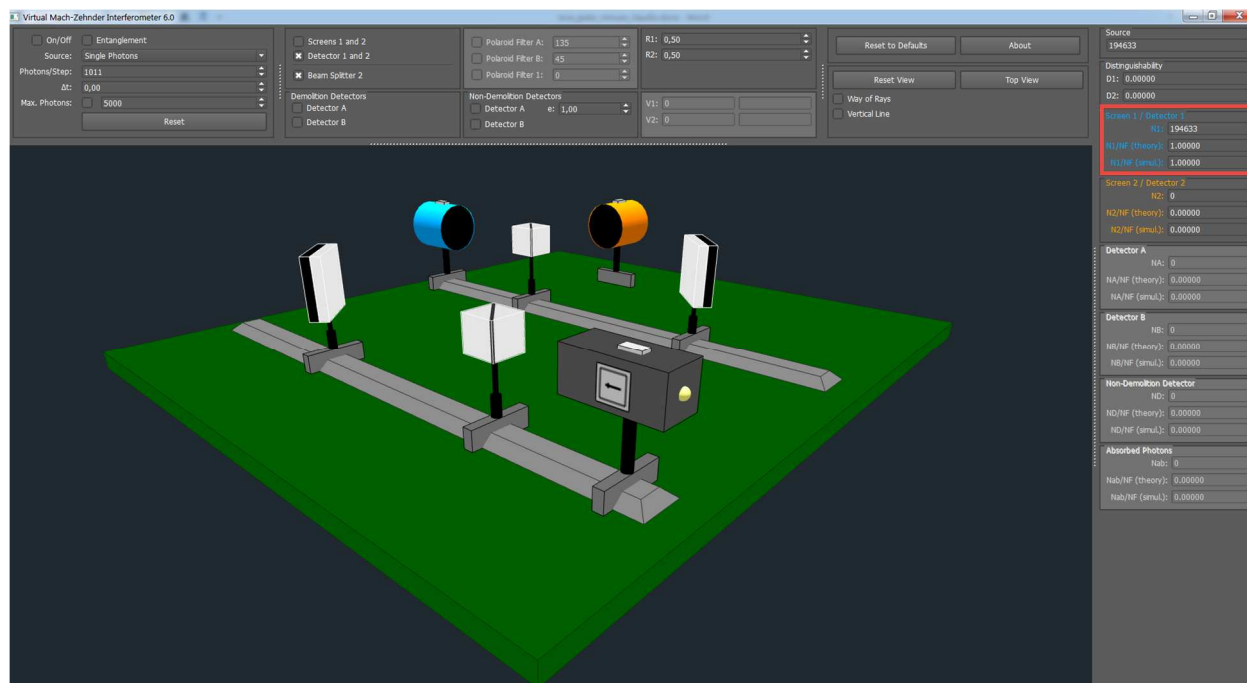


Figura 20: Detecções de fótons individuais apenas no detector D_1 (azul). A contagem dos fótons no detector é mostrada onde está posicionado o retângulo vermelho, à direita na figura.

1. E2: Detecta só um de cada vez.
2. E1: Sim, mas tá chegando só no D_1 . Sei lá, é estranho!
3. E2: O professor falou pras gurias que o detector tá mirando só no centro. ... É
4. um 'feixe colimado'.
5. E1: Mas não resolve muita coisa.
6. E2: Olha aqui, óh. Botando os anteparos de volta mostra que tem luz nos dois.
7. E1: Aqui não é mais com *laser*, é com fótons.
8. E2: É.
9. E1: Então dá pra dizer que tá tendo interferência?
10. E2: Sim, mas ele pediu pra fazer com detectores.
11. E1: Tá. Agora tem que dizer se é ondulatório ou corpuscular.
12. E2: É onda.
13. E1: Mas os fótons não são partículas? Daí tem que ser corpuscular.
14. E2: Mas é que tem interferência. Então é onda.
15. E1: Esquisito!

Durante a atividade com o IVMZ operando em regime clássico, E1 se saiu melhor em relação às explicações das detecções nos anteparos, entretanto esta situação parece ter se invertido, pelo menos durante a explicação da distribuição das detecções, que ocorrem somente no detector D_1 .

Frente à manifestação de dúvida por parte de E1, “Sei lá, é estranho!” (linha 2), a estudante E2 tem agora uma situação favorável para assumir o papel de parceiro mais capaz. Além de E1 ter manifestado sua incapacidade inicial para compreender o fenômeno (linha 2), é a estudante E2 quem agora está manipulando o *software*, de modo que o fato de ela estar liderando o uso dessa ferramenta cultural favorece a condução das discussões. É E2 quem altera os dispositivos no IVMZ e faz isso conforme a explicação que pretende dar ao colega. Situação semelhante ocorreu no roteiro exploratório I, quando por diversas vezes, E1, de forma deliberada, modificou configurações no *software* e acabou contribuindo positivamente para o trabalho da dupla (interação 3, linha 19; interação 4, linhas 8-10 e 14).

Conforme mostra o enunciado “Olha aqui, óh. Botando os anteparos de volta mostra que tem luz nos dois” (linha 6) é E2 quem decide, sem consultar o colega, pela devolução dos anteparos a fim de comparar as detecções pontuais de agora com a formação do padrão de interferência usando *laser*.

Além de usar a manipulação do *software* a seu favor, E2 retoma o enunciado do professor, durante interação com outra dupla, para organizar seu raciocínio, como aparece no enunciado “O professor falou pras gurias que o detector tá mirando só no centro. ... É um feixe colimado.” (linhas 3-4). Na linha 4, ao mudar a entonação para proferir a expressão ‘feixe colimado’ E2 parece realmente ter entendido o que o professor disse às colegas, uma vez que se verifica a articulação deste termo com sua afirmação anterior (“O professor falou pras gurias que o detector tá mirando só no centro”, na linha 3), claramente destinada a E1. A mudança de entonação que E2 imprime na expressão ‘feixe colimado’ pode indicar que tomou uma atitude de parceiro mais capaz frente a E1, adotando uma postura professoral.

Outro momento bastante claro no diálogo é a dificuldade que E1 manifesta para conciliar o caráter ondulatório do fenômeno com a ideia de partícula que atribui ao fóton, o que fica evidente no enunciado “Mas os fótons não são partículas? Daí tem que ser corpuscular” (linha 13). Esta contradição é um elemento a ser considerado na análise

dos diálogos subsequentes, visto que a continuidade da simulação explora justamente a complementaridade onda-partícula.

Tem-se neste diálogo um primeiro sinal de tensionamento, mesmo que leve, em relação ao estabelecimento da posição de parceiro mais capaz, visto que E2 cerca-se de estratégias (está manipulando o *software*, recorre a enunciados do professor e se coloca como alguém que conhece mais do que E1 ao explicar-lhe o que significa feixe colimado) para assumir a liderança nas discussões e na condução da atividade.

Interação 6: Contexto situacional – Com a inserção de um detector demolição no braço A (questões 6 e 7), os estudantes foram questionados novamente em relação à inferência do caminho tomado por um fóton e a natureza do fenômeno.

A figura 21 representa a configuração utilizada. Todos os fótons no caminho A são detectados pelo detector que foi inserido, o que permite afirmar que os fótons detectados em D_1 e D_2 estão associados ao caminho B. Isso implica total informação disponível sobre qualquer um dos fótons detectados, o que é representado por distinguibilidade $D_i = 1$ para cada um dos detectores. Total informação disponível caracteriza um fenômeno em que prevalece a natureza corpuscular logo, não há formação de padrão de interferência.

1. E1: Tá, esse ficou fácil. Os fótons passam pelo caminho B.
2. E2: Então me diz como tu descobriu isso.
3. E1: É que o detector verde mata os fótons que passam por aqui [caminho A].
4. E2: Isso aí. Tem natureza corpuscular então.
5. E1: Bah, isso eu ainda não to sacando.
6. E2: Imagina que tu tem um monte de fótons aqui e aqui. Os que vão por aqui
7. [caminho A] são pegos no detector.
8. E1: Tipo bolinhas?
9. E2: Pode ser. Daí, como tu sabe o caminho, é corpuscular.
10. E1: Tá, mas e como que tem que ser pra ficar ondulatório?
11. E2: Igual antes. É só tirar esse detector daqui [no caminho A].
12. E1: Uhm::

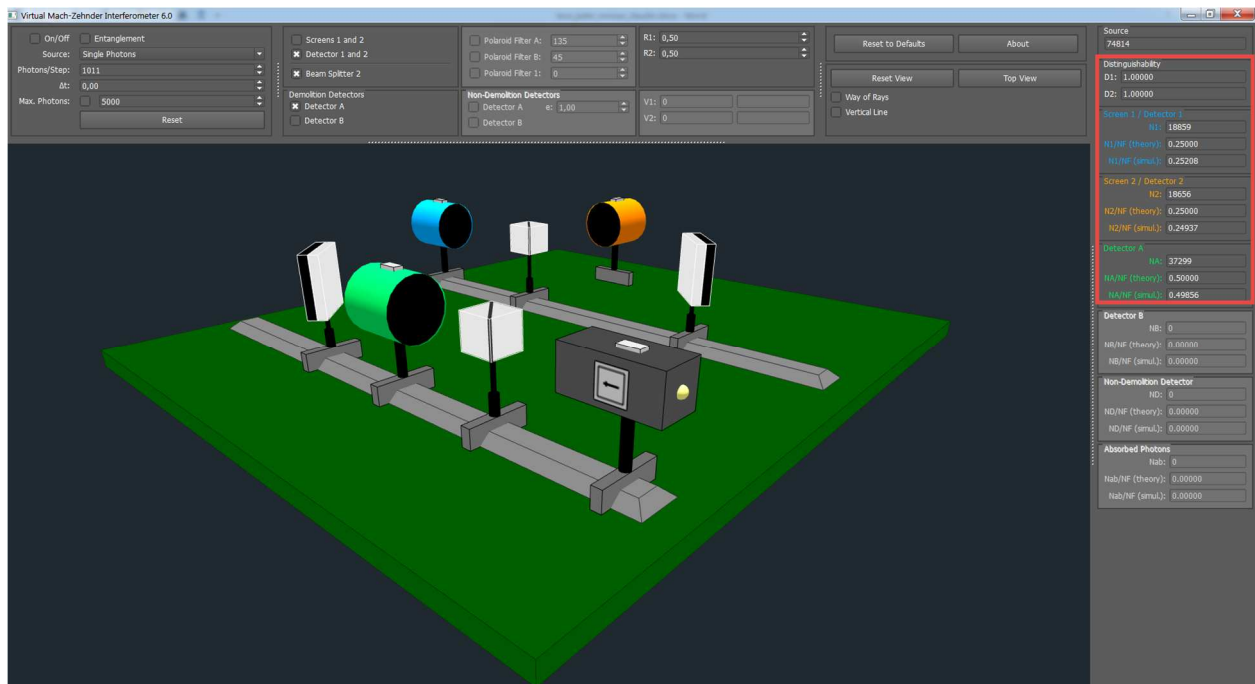


Figura 21: Total informação disponível sobre o caminho associado aos fótons em D_1 e D_2 , devido à presença do detector A (verde) no braço A. As contagens de fótons nos três detectores e a distinguibilidade (igual a 1) aparecem na região marcada com o retângulo vermelho.

A estudante E2 procura auxiliar o colega na aprendizagem a partir da interpretação dos enunciados deste, como pode ser visto em “Então me diz como tu descobriu isso” (linha 2). A dificuldade do estudante E1 em interpretar a natureza do fenômeno envolvido, entretanto, manifesta-se novamente. A estratégia utilizada (linha 8) para tentar encontrar uma resposta ao problema apresentado recai na adoção de um modelo clássico para os fótons, associando-se a contrapalavra “bolinhas”, algo que não trará nenhuma contribuição no sentido de uma compreensão genuína. Este modelo parece ser aceitável também para E2. Embora não adote de forma explícita essa noção, é possível que E2 considere algum modelo misto onda-partícula onde a noção de bolinhas seja considerada, pois a mesma concorda, pelo menos parcialmente com o colega quando exprime que “Pode ser” (linha 9). Apesar da breve explicação de E2, a dúvida ainda permanece para E1 quanto à natureza do fenômeno, dado o questionamento que faz (linha 10).

Interação 7: Contexto situacional – Na questão 8, os estudantes foram instruídos a retirarem o detector demolição que haviam colocado no caminho A e também o segundo divisor de feixe, obtendo a configuração representada na figura 22. Nesse contexto, os

estudantes deveriam analisar a relação entre a distinguibilidade e a natureza ondulatória ou corpuscular do fenômeno, além de verificar a possibilidade de inferir caminho.

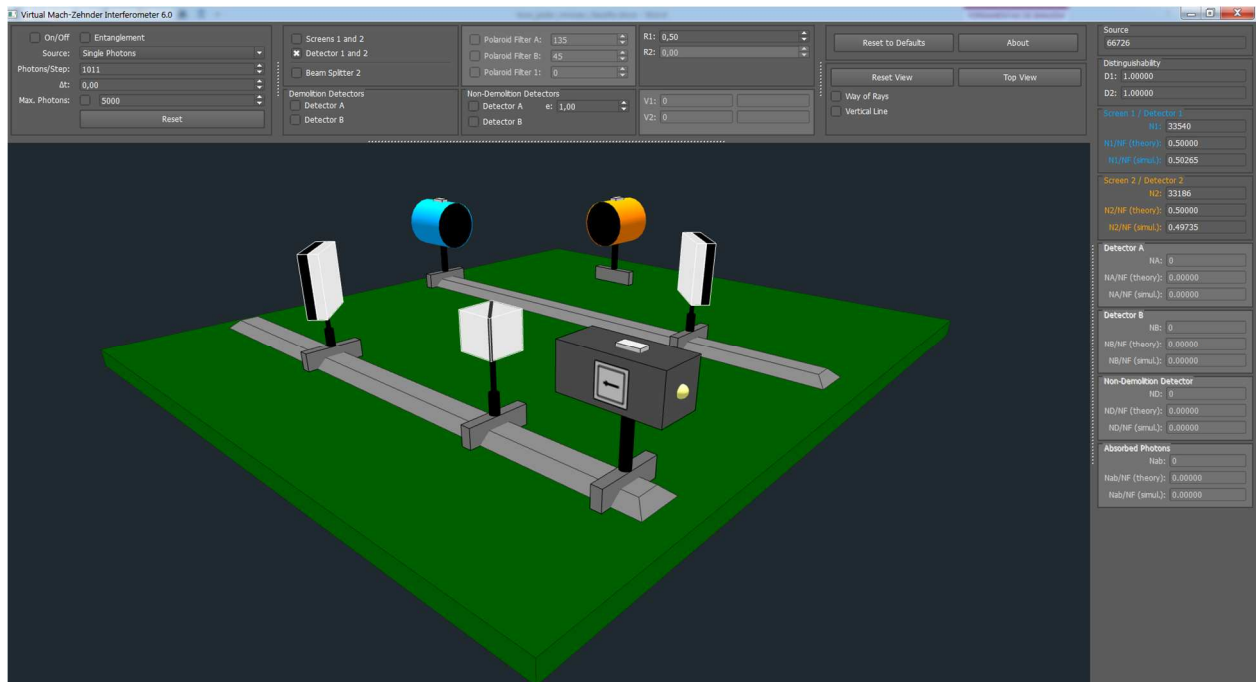


Figura 22: O IVMZ operando em regime quântico e sem o segundo divisor de feixe. Essa configuração permite ter certeza sobre o caminho associado ao fóton e, portanto, a distinguibilidade relativa a cada detector é 1.

Nesse caso, todos os fótons detectados em D_1 (detector azul) estarão associados ao caminho B, enquanto os fótons detectados em D_2 (detector laranja) tomaram o caminho A. Mesmo que não esteja envolvida uma medição propriamente dita, o simples fato de haver informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons implica um comportamento corpuscular, com distinguibilidade $\mathcal{D}_i = 1$.

1. E1: Daí ficou fácil. ... É caminho A pra quem chega no D2 e caminho B pra quem
2. chega no D1. Agora não tem mais como bater naquele semirrefletor.
3. E2: Coloca aí também que não tem interferência e que é corpuscular.
4. E1: Mas tu disse que era onda antes!
5. E2: Isso era lá na outra. Agora é partícula.
6. E1: Ah bom! ...Tá falando aqui que tem que relacionar com a distin/,
7. distinguibilidade.
8. E2: Já não tinha falado nisso? Acho que foi no outro roteiro.
9. E1: Não. É aqui, óh! [estudante lê a dica 2 do roteiro].
10. [Silêncio]

11. E2: Tá! Então tá certo. A distinguibilidade é 1, óh. Isso significa que temos
12. certeza da trajetória.
13. E1: Repete aí.
14. E2: Coloca o que tá na dica 2. É bem isso que eu te falei.

Neste diálogo, há uma clara interanimação de vozes não apenas entre E1 e E2, mas também entre eles e o roteiro enquanto ferramenta mediadora (linha 8). Nos enunciados “Tá falando aqui que tem que relacionar com a distin/, distinguibilidade” (linhas 6-7) e “É aqui, óh!” (linha 9), quando E1 lê a dica 2, mais uma vez a interanimação se dá entre eles e as ferramentas mediadoras.

Na análise do diálogo 6, conforme já apontado, E1 manifestou certa confusão entre os caracteres onda e partícula atribuídos ao fóton. Novamente, no enunciado “Mas tu disse que era onda antes!” (linha 4) este estudante demonstra não estar interpretando corretamente o comportamento exibido pelo fóton de acordo com o tipo de experimento realizado. A sua concordância, “Ah bom!” (linha 6), em relação ao enunciado anterior de E2, “Isso era lá na outra. Agora é partícula.” (linha 5) evidencia tal dificuldade.

Como a estudante E2 consegue dialogar mais facilmente com o roteiro exploratório, interpretando os conceitos ali contidos e utilizando-os em suas explicações, a sua posição de parceiro mais capaz perante a dupla começa a se firmar mais explicitamente. A associação da contrapalavra ‘não tem interferência’ para classificar o fenômeno e, por conseguinte, o comportamento do fóton, como corpuscular, mostra que essa estudante está construindo seu discurso e manifestando discursivamente sua compreensão do fenômeno (mesmo que incipiente) a partir da mediação com o roteiro exploratório, com o *software* e a partir das trocas discursivas com o colega, o que se alinha à concepção de ‘aprendizagem mediada por ferramentas culturais’ (VYGOTSKY, 1994).

Interação 8: Contexto situacional – Nas questões 9 e 10, os estudantes deveriam recolocar o segundo divisor de feixe (BS_2) no interferômetro e inserir um detector não-demolição no braço A (ver figura 23). A partir disso, foram questionados em relação à natureza do fenômeno e à informação disponível.

Um fóton que é emitido pela fonte, tem seu estado translacional transformado em uma superposição de estados após sua interação com BS_1 , de modo que este estado pode ser escrito como $|\psi_{BS_2}^I\rangle = i\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)|s_y\rangle + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)|s_x\rangle$, se o primeiro divisor de feixe for balanceado (ver seção 3.1). Uma vez interagindo com o detector não-demolição, o estado translacional do fóton passa a estar correlacionado com os estados internos dos componentes microscópicos do detector, em um processo que se chama de *pré-medição*. Nesse processo, o detector literalmente ‘marca’ o caminho associado ao fóton⁸⁰.

Isso implica obter informação relativa ao caminho e, caso o detector tenha eficiência 1, isso caracteriza um fenômeno puramente corpuscular (distinguidade $\mathcal{D}_i = 1$ para ambos os anteparos), destruindo totalmente o padrão de interferência. Caso haja detectores nas saídas 1 e 2 do interferômetro (caso mostrado na figura 23), a perda da interferência se traduz em passar a ter incidência de fótons no detector 2 (laranja).

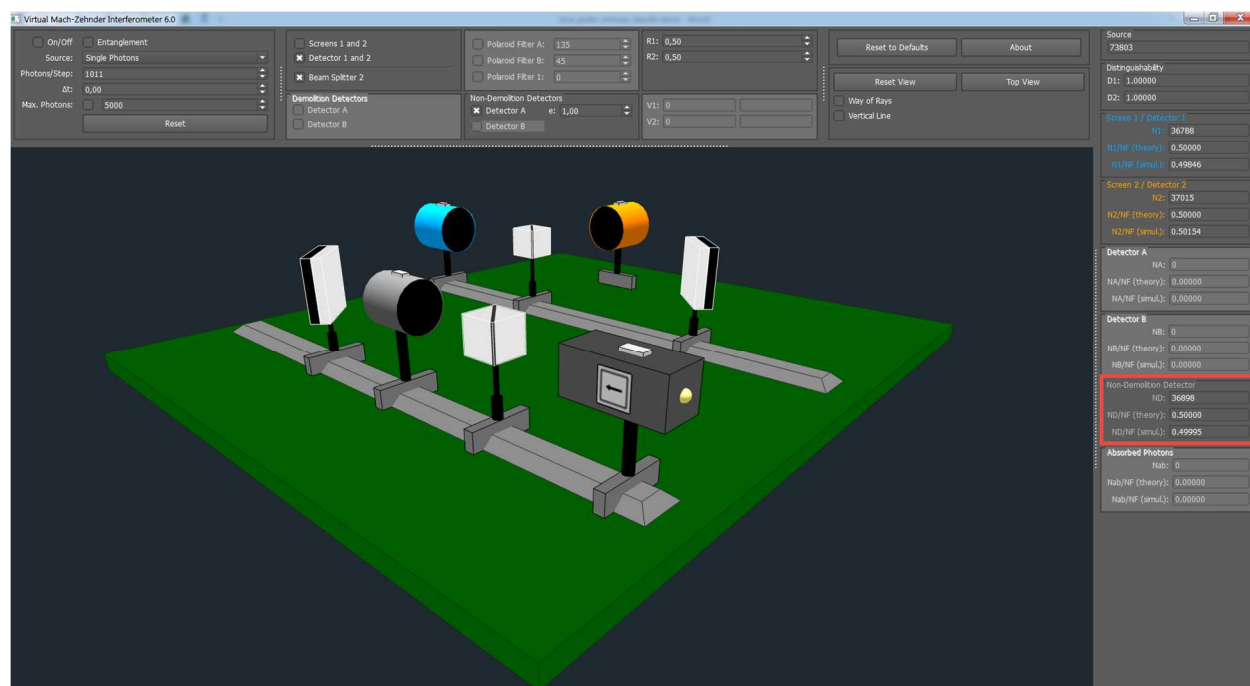


Figura 23: Marcação do caminho por meio de um detector não-demolição inserido no braço A. A contagem de fótons nesse detector (cuja eficiência é 1) é mostrada no retângulo vermelho. Diferente do detector demolição, esse detector não absorve o fóton ao interagir com ele.

1. E2: Hu::m.

⁸⁰ Para maiores detalhes, ver os trabalhos de Ferrari e Braunecker (2010) e de Luis e Gonzalo (2015), sendo que esse último trata de um detector não-demolição imperfeito (possibilidade que pode ser também abordada no IVMZ).

2. E1: Entendeu esse?
3. [Silêncio]
4. E2: Cara, agora eu tô confuso.
5. E1: Ele tá dizendo que esse detector aí não destrói o fóton.
6. E2: Sim, o nome dele já tá dizendo. Mas isso não ajuda muito.
7. E1: Chega fóton nos dois né.
8. E2: Pois é, mas eu não sei de onde vêm os fótons que chegam nesse detector
9. aqui. ... Nem pra esse outro.
10. E1: Se não tem interferência é corpuscular. Lembra?
11. E2: Aqui tá confuso. Olha, a distinguibilidade tá dando 1.
12. E1: E daí?
13. E2: Daí que esse é o problema. ... Se a distinguibilidade é 1 eu tenho informação,
14. mas acontece que eu não sei que informação é essa.
15. E1: Mas a informação não é o fato de ter fótons aqui nesse caminho do detector
16. [braço A]?
17. E2: Isso não diz nada. É corpuscular, por causa da informação disponível. Mas
18. qual informação?

A preocupação da estudante E2 está voltada à inferência de caminho tomado pelos fótons, de modo que esta não consegue conciliar o valor da distinguibilidade ($\mathcal{D}_i = 1$) com a aparente falta de informação, o que fica explícito quando enuncia “Se a distinguibilidade é 1 eu tenho informação, mas acontece que eu não sei que informação é essa” (linhas 13-14).

Apesar da impossibilidade de resolver a questão proposta, para E2 já está claro que a informação disponível sobre o fóton identifica o caráter corpuscular do fenômeno (linhas 17-18), quando enuncia “É corpuscular, por causa da informação disponível”. Além disso, chama atenção que E2 tentou primeiro explicar o fenômeno partindo da análise da montagem experimental (linhas 8-9) e somente depois observou o valor de distinguibilidade indicado pelo *software* (linha 11). Não há como afirmar se isso foi ou não intencional, mas o fato é que fica evidente o esforço dessa estudante no sentido de compreender o fenômeno a partir da interpretação dos resultados da medição. E1 procura entender os resultados nos detectores, inicialmente retomando um enunciado de E2 (linha 10) mas, o aspecto que lhe parece relevante para identificar a natureza do fenômeno é a formação ou ausência do padrão de interferência (linha 10).

O que se observa aqui é que não foi possível estabelecer uma relação entre o tipo de medida realizada (não-demolição) e a informação disponível (ou desaparecimento do padrão de interferência)

Interação 9: Contexto situacional – A montagem experimental consiste na utilização de anteparos, na questão 13, para que os estudantes relacionem a natureza do fenômeno com a informação disponível e a visibilidade dos padrões de interferência. Tal situação está mostrada na figura 24.

Os coeficientes de reflexão e transmissão dos divisores de feixe indicam as probabilidades de que estes eventos ocorram. Como ambos os divisores de feixe estão balanceados, não há informação disponível sobre o caminho associado a um fóton que produz uma marca em qualquer um dos anteparos, pois a probabilidade do mesmo estar associado a qualquer um dos dois caminhos (A ou B) é a mesma. Essa ausência de informação disponível implica um caráter ondulatório ao fenômeno e o que se observa são padrões de interferência com visibilidade máxima.

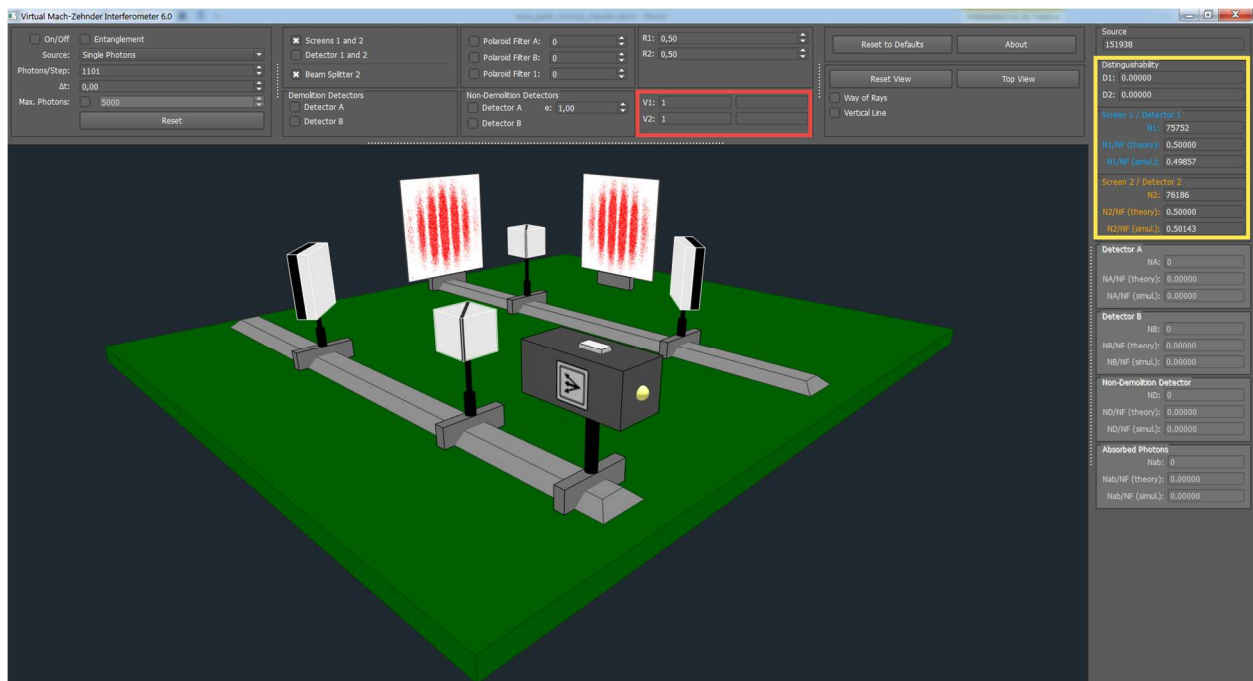


Figura 24: Padrões de interferência com máxima visibilidade, quando os divisores de feixe são balanceados. O retângulo vermelho mostra os valores das visibilidades nos anteparos e o amarelo sinaliza onde são mostradas as distinguibilidades e as contagens de fótons nos anteparos.

1. E1: Ah, agora apareceu a figura de novo.
2. E2: Tu viu que é igual àquela da interferência com *laser*?

3. E1: É ondulatório.
4. [Silêncio]
5. E1: Como que fica a questão da informação?
6. E2: Isso já dá pra saber desde o início. Vai ser zero nos dois [anteparos].
7. E1: Bah, não saquei ainda!
8. E2: É que conforme tu faz o experimento tu muda ela. Se tiver um detector tu
9. mexe nela, daí tu tem informação.
10. E1: Como assim?
11. E2: Aqui tanto faz o caminho. Não tem como saber.
12. E1: Vamos botar as duas trajetórias então!
13. E2: Não, isso quer dizer que não dá pra descobrir o caminho. ... Pode chegar tanto
14. daqui quanto daqui.
15. E1: Deixa eu anotar isso.
16. E2: ... O que mais tem aí?
17. E1: Relacionar com visibilidade. [Leitura da dica 4].
18. E2: Tá. A distinguibilidade é zero nos dois e a visibilidade é 1.
19. E1: Se tá visível não tem como distinguir.
20. E2: É. Se tu tiver corpuscular não faz sentido falar em visibilidade e daí a
21. distinguibilidade fica 1, que nem antes.

Os enunciado de E2 “Isso já dá pra saber desde o início” (linha 6) e “É que conforme tu faz o experimento tu muda ela” (linha 8) mostra uma interanimação de vozes discursivas, pois a noção que está aqui implícita de que a configuração do experimento determina um comportamento corpuscular ou ondulatório não se fez presente nos enunciados anteriores desses estudantes, aparecendo nesse diálogo pela primeira vez. É, possivelmente, um sinal de que se estabeleceu um plano de intersubjetividade, propiciado pelo uso dos diversos elementos mediadores (roteiros, curso, *software*, todos contribuindo no papel de mediação semiótica). Essa estudante, ao propor que “Se tu tiver corpuscular não faz sentido falar em visibilidade e daí a distinguibilidade fica 1” (linhas 20-21) faz uma referência que é importante para a compreensão da complementaridade onda-partícula. Apesar de ainda abordar uma situação extrema ($\mathcal{V}_i = 1$ e $\mathcal{D}_i = 0$), a relação entre distinguibilidade e visibilidade parece bem estabelecida, o que poderia sinalizar um domínio incipiente destes conceitos (WERTSCH, 1998). Nas linhas 11 e 13, E2 parece ter percebido que é possível inferir caminho associado ao fóton, mas esse palpite se reduz à adivinhação. Embora não use uma linguagem precisa

e fluente, consegue perceber o que está por trás das relações (17) e (18), relativas à probabilidade de emitir um palpite correto sobre o caminho associado ao fóton no interferômetro (mesmo sem ter conhecimento formal dessa relação, pois intencionalmente não foi tratada no curso). Isso se alinha à ideia de Wertsch (2007, p. 187) de que mesmo um domínio rudimentar de uma ferramenta semiótica permite realizar satisfatoriamente um grande número de atividades que necessitam de seu uso – essa característica das ferramentas mediadoras são grandes aliadas da boa instrução.

E1, mesmo interagindo com os enunciados de E2, ainda guia sua interpretação tomando como ponto de partida a visualização de uma figura de interferência nos anteparos. Isso pode explicar sua dificuldade na compreensão do fenômeno quando foram utilizados detectores, pois não há representação visual tal como nos anteparos (diálogo 5, linha 9; diálogo 6, linha 5; diálogo 7, linha 14 e diálogo 8, linha 15) e mostra uma dificuldade dele em se mover entre recursos semióticos distintos para perceber se há ou não interferência (no caso em que detectores estão nas portas de saída ao invés de anteparos, o único recurso semiótico disponível para perceber a interferência são as contagens – não há um recurso pictórico como no caso dos anteparos). Sua interpretação da relação entre visibilidade é ainda confusa, visto pelo enunciado sem sentido claro “Se tá visível não tem como distinguir” (linha 19).

Interação 10: Contexto situacional – A interação discursiva entre os estudantes na questão 14 ocorreu a partir da alteração nos coeficientes de reflexão e transmissão do primeiro divisor de feixe (BS_1), de modo que $R_1 = 0,80$. A figura 25 ilustra os padrões obtidos nos anteparos.

Essa configuração adotada para BS_1 possibilita inferir que, em qualquer um dos anteparos, a maioria (cerca de 80 por cento) dos fótons que formam os padrões de interferência estão associados ao caminho B do interferômetro, decorrente da maior probabilidade de reflexão naquele divisor de feixe. Um dado fóton, indiferente a qual caminho pode ser associado, tem igual probabilidade de ser detectado no anteparo 1 e no 2, pois no segundo divisor de feixe as probabilidades de reflexão e transmissão são iguais. Mesmo assim, essa distribuição desigual de fótons entre os caminhos A e B já configura informação disponível sobre caminho.

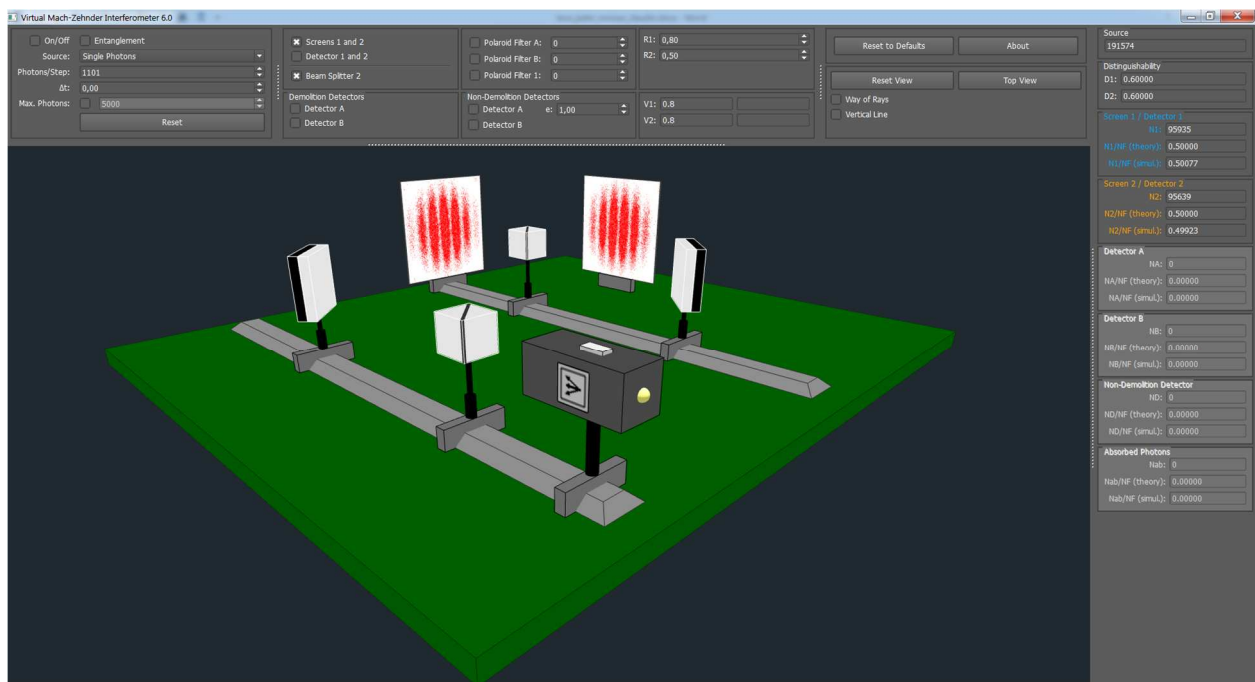


Figura 25: Padrões obtidos com os divisores de feixe desbalanceados, sendo $R_1 = 0,80$ e $R_2 = 0,50$. A visibilidade nos anteparos é 0,8 e a distinguibilidade 0,6.

1. E1: Tem a interferência, mas a figura tá bem suja. ...Tu atualizou ela?
2. E2: Ahan. ... É que nem um sinal, mas cheio de ruído. Tem sinal e ruído ao
3. mesmo tempo.
4. E1: E agora? Tem interferência e não tem ao mesmo tempo.
5. E2: Não é que não tem. Tem, mas tá borrada.
6. [Silêncio].
7. E2: Tem lógica, agora é 0,6 e tá meio borrado.
8. E1: É, tá borrado, mas ainda dá pra ver as linhas.
9. E2: Agora temos um pouco de informação sobre o caminho.
10. E1: 60 por cento de informação?
11. E2: Não sei, tem que ver a probabilidade.
12. E1: Mas ele ainda não disse como que calcula.
13. E2: Não precisa falar na probabilidade, só que temos um pouco de informação.
14. E1: Mas como que classifica?
15. E2: É ondulatório e um pouco parti/, corpuscular.
16. E1: Como assim?
17. E2: Tá falando ali, óh, 'fenômenos intermediários'.
18. E1: Ah:: Agora quer saber da visibilidade. ... Daí é aquele lance de que uma
19. depende da outra, né.

Frente à dificuldade inicial encontrada por E2, como forma de organizar o pensamento e possibilitar alguma justificativa para a diferença nas detecções obtidas, esta estudante parte de alguma experiência anterior, procurando estabelecer uma analogia para a aparente ambiguidade à sua frente. O enunciado “É que nem um sinal, mas cheio de ruído. Tem sinal e ruído ao mesmo tempo.” (linhas 2-3) parece uma simples analogia, mas é bem mais do que isso. A estudante E2 faz uso de recursos semióticos que são próprios da teoria de processamento de sinais, contexto com o qual talvez tenha algum contato (não evidenciado no seu discurso) e que lhe permite essa atitude responsiva na forma de uma contrapalavra.

O fenômeno em questão (interferência quântica com contraste 0,8, ou seja, abaixo de 1) não guarda relação com a teoria de processamento de sinais e o termo “ruído” é incorreto nessa situação. Mas é justamente o fato de a estudante usar esta expressão que permitiu que ela, junto com E1, gradativamente fosse entendendo o fenômeno apresentado. Se fosse amputada a possibilidade de E2 se expressar dessa forma ‘inadequada’, provavelmente o elo de comunicação entre ela e E1 teria sido severamente prejudicado. Esse enunciado auxilia os estudantes a compreenderem a existência da interferência, sobreposta a uma ‘não-interferência’, levando-os a organizar o pensamento em termos de informação disponível sobre o caminho do fóton e concluir a explicação (linhas 7-9). Também é a ideia de informação disponível que conduz a estudante E2 à fazer a síntese “É ondulatório e um pouco parti/, corpuscular.” (linha 15), embora a noção que esta tem de fenômeno intermediário não tenha sido interpretada com uso de gêneros de discurso típicos de comunidades que trabalham com FQ.

Interação 11: Contexto situacional – As discussões iniciadas na questão 14 (diálogo anterior) do roteiro exploratório estenderam-se pelas questões 15 (onde foram utilizados os valores $R_1 = 0,90$ e $R_2 = 0,10$) e 16 ($R_1 = R_2 = 0,10$).

Na questão 15 os valores utilizados para os coeficientes de reflexão e transmissão correspondem a uma probabilidade de 90 por cento de reflexão em BS_1 (10 por cento de transmissão) e probabilidade de 10 por cento de reflexão em BS_2 (90 por cento de transmissão). Isso implica uma probabilidade maior de que os fótons estejam associados ao caminho B, após o primeiro divisor de feixe e, dada a maior probabilidade de transmissão no segundo divisor de feixe, uma quantidade maior de fótons é detectada

no anteparo 1 quando comparado com o anteparo 2. A figura 26 ilustra os padrões obtidos nos anteparos. Com essa configuração, para cada 1000 fótons emitidos pela fonte, aproximadamente 820 serão detectados no anteparo 1 e 180 no anteparo 2. O fato de ambos os divisores de feixe estarem desbalanceados insere informação sobre o caminho para os fótons detectados no anteparo 1, mas uma informação parcial, embora alta ($\mathcal{D}_1 \approx 0,98$). Em relação aos fótons detectados no anteparo 2 não há nenhuma informação disponível, ou seja, $\mathcal{D}_2 = 0$. Nesse anteparo a probabilidade de estarem associados ao caminho B e serem refletidos no segundo divisor de feixe (proporcional ao produto $R_1 R_2$ ⁸¹) é idêntica à probabilidade de estarem associados ao caminho A e serem transmitidos neste dispositivo (proporcional ao produto $T_1 T_2$).

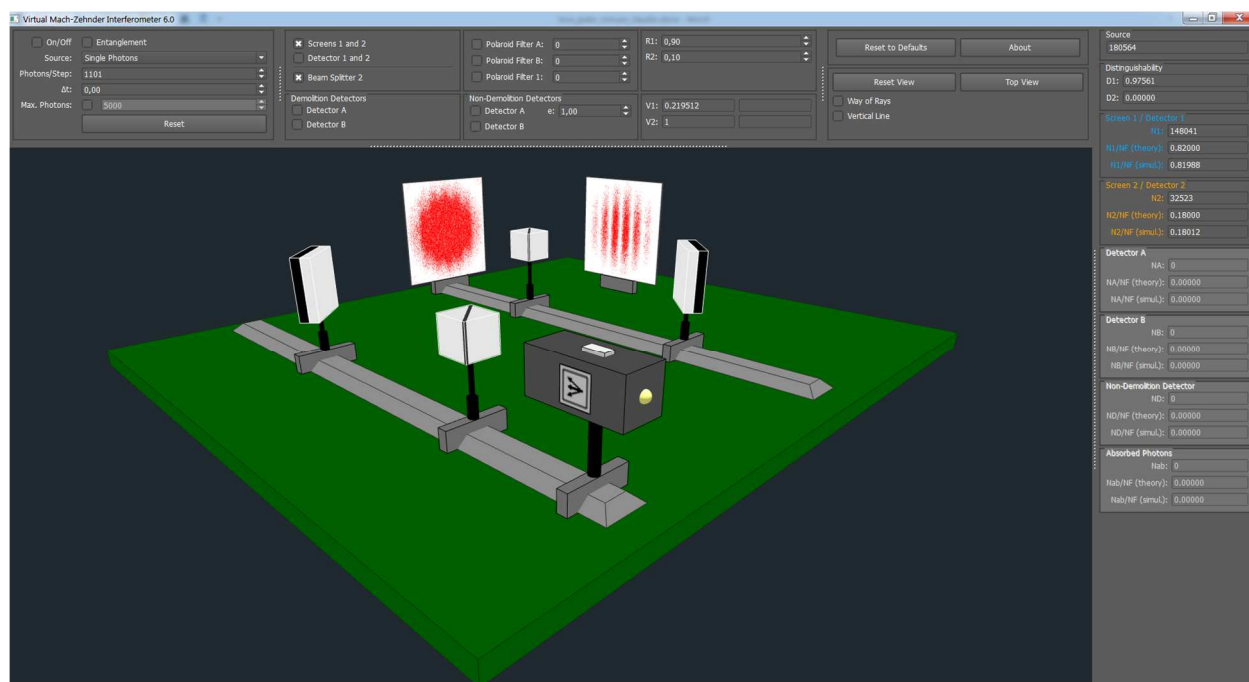


Figura 26: Fenômeno intermediário obtido com $R_1 = 0,90$ e $R_2 = 0,10$. No anteparo 2 a visibilidade é 1 e a distinguibilidade é 0. No entanto, no anteparo 1 a visibilidade é bem menor e está em torno de 0,22, enquanto que a distinguibilidade é aproximadamente 0,98.

Na questão 16, há uma maior probabilidade de que os fótons estejam associados ao caminho A, após o primeiro divisor de feixe e, dada a maior probabilidade de transmissão no segundo divisor de feixe, uma quantidade maior de fótons é detectada no anteparo 2 quando comparado com o anteparo 1. A figura 27 ilustra os padrões obtidos nos anteparos. Para cada 1000 fótons emitidos, cerca de 820 serão detectados

⁸¹ Ver a seção 3.3.

no anteparo 2 e os 180 restantes no anteparo 1 (o contrário do caso anterior). Os valores utilizados para os coeficientes de reflexão dos dois divisores de feixe inserem, como no caso anterior, informação parcial sobre o caminho para os fótons detectados no anteparo 2 ($\mathcal{D}_2 \approx 0,98$). Já para os fótons detectados no anteparo 1 não há nenhuma informação disponível, visto que a probabilidade de estarem associados ao caminho B e serem transmitidos no segundo divisor de feixe (proporcional ao produto R_1T_2) é idêntica à probabilidade de estarem associados ao caminho A e serem refletidos neste dispositivo (proporcional ao produto R_2T_1).

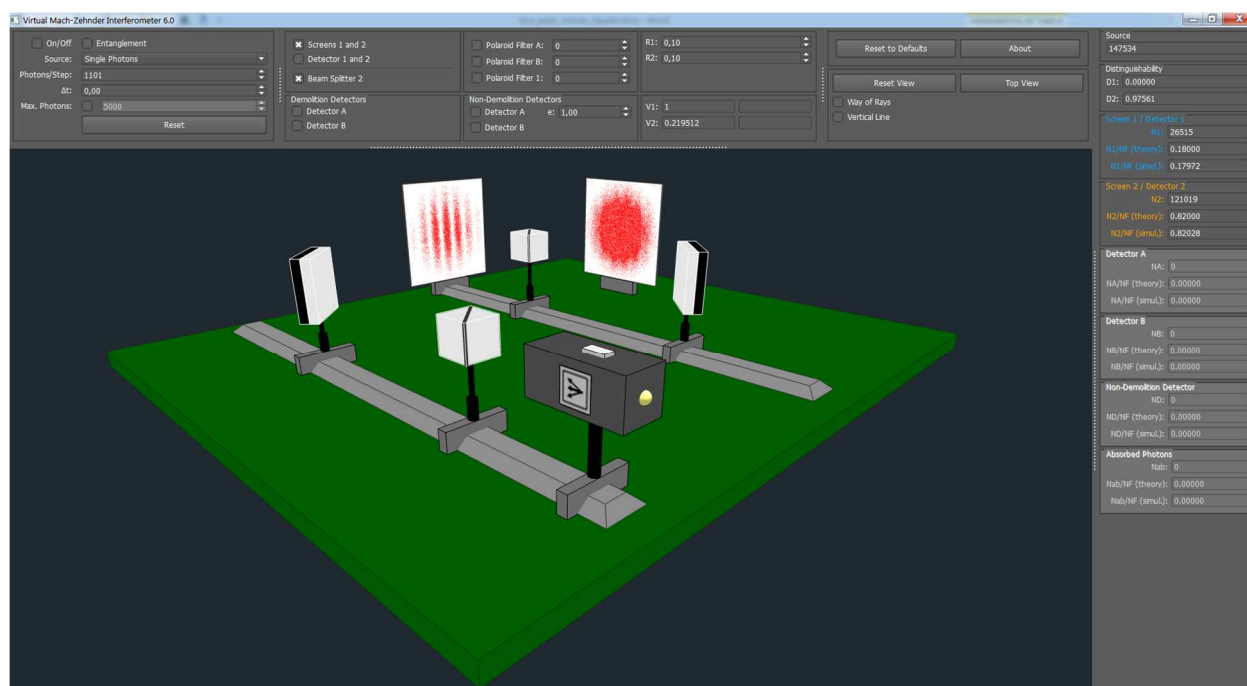


Figura 27: Fenômeno intermediário obtido com $R_1 = R_2 = 0,10$. Nesse caso, é no anteparo 1 que a visibilidade é 1 e a distinguibilidade é 0. No anteparo 2 a visibilidade fica em torno de 0,22, enquanto que a distinguibilidade é aproximadamente 0,98.

O estudante E1 ainda está anotando a resposta da questão anterior quando E2 parte para a questão seguinte, interrompendo-o:

1. E2: Que massa. Olha aqui, óh.
2. E1: Como que tu fez isso?
3. E2: Tá na 15.
4. E1: Que doidera! ... Deixa eu terminar a 14 aqui.
5. E2: Tá borrada num e tem a figura no outro. [Nesse instante E1 está lendo a
6. questão 15 em voz alta].
7. E1: Quanto tem ali na visibilidade?

8. E2: V_1 igual a 0,21 e V_2 é 1.
9. E1: D_1 igual a 0,97 e D_2 igual a zero.
10. E2: Esse não é intermediário!
11. E1: Tem o caderno aí? ... O professor tinha falado um negócio sobre os valores.
12. E2: Tenho. [...] Óh! É ondulatório no anteparo 2. Deu V igual a 1.
13. E1: Totalmente visível.
14. E2: É, bem nítido.
15. E1: Deixa eu escrever isso. [Enquanto isso E2 segue folheando o caderno].
16. E1: Tem alguma coisa aí pra explicar o borrão?
17. E2: Não é bem um borrão. Olha bem na beiradinha pra ver como tem as linhas.
18. E1: É, mas não dá pra ver quase nada.
19. E2: Mas tem. Coloca aí que é intermediário.
20. E1: Mais corpuscular do que ondulatório, porque não dá pra ver a figura direito.
21. E2: Anota aí, óh: Tem bastante informação disponível sobre os fótons do
22. anteparo 1, daí é mais corpuscular. No outro não tem nada de informação.
23. P: E então, como podemos interpretar este resultado?
24. E2: Bah::, não sei, professor, mas a questão de informação disponível eu sei que
25. tá certa.
26. P: Problemão este, né. [...] Deixa eu ver como que o restante do pessoal tá
27. fazendo pra falar um pouco sobre isso. Enquanto isso verifiquem a questão 16.
28. E1: Só muda o R_1 pra 0,1.
29. E2: Inverteu as figuras.
30. E1: O V_1 e V_2 também.
31. E2: Sim, mas primeiro tu tem que olhar aqui no D.
32. E1: É que me entendo melhor pelas figuras.
33. E2: Aqui tá bem borrado [anteparo 2] porque os fótons passam pelo primeiro
34. divisor e pelo segundo [caminho A]. Quer dizer, a maioria passa né.
35. E1: E nesse anteparo [anteparo] ?
36. E2: Nesse daí não dá pra dizer por onde vem.
37. E1: Que negócio complicado. Antes era bem ao contrário.
38. E2: É que se tu muda os índices aqui tu muda a informação disponível.

O conceito de visibilidade é resgatado quando a dupla recorre ao roteiro e ao próprio caderno, buscando anotações de questões anteriores, as quais permitem aos estudantes incorporar o conceito de visibilidade à sua explicação. Isto pode ser observado nos enunciados “Tem o caderno aí? ... O professor tinha falado um negócio

sobre os valores.” (linha 11) e “Tenho. [...] Óh! É ondulatório no anteparo 2. Deu V igual a 1” (linha 12). Ou seja, tais enunciados são falas mediadas pelo roteiro.

Apesar de recorrerem a outras formas de mediação além do *software* e do roteiro exploratório, é de se esperar que os estudantes não relacionem, por conta própria, as detecções ao princípio da complementaridade. Os estudantes E1 e E2, embora persistam na busca por uma explicação ao fenômeno observado, não conseguem organizar suas ideias de maneira clara, entrando, de certa forma, em um ciclo vicioso (observação dos anteparos, conferência dos valores da visibilidade [E1] e distinguibilidade [E2], tentativa de compreender a informação disponível). E1 prioriza a visualização dos padrões obtidos nos anteparos, enquanto E2 procura interpretar o fenômeno em função da distinguibilidade.

E2 consegue inferir o caminho tomado pelos fótons a partir de diversas configurações do interferômetro (linhas 21-22, 33-34 e 36), inclusive se refere à ‘informação disponível’ e a relaciona com as probabilidades de reflexão e transmissão nos anteparos (linha 38), entretanto, não consegue articular completamente os conceitos envolvidos à fenomenologia (linha 24-25). Esse enunciado permite afirmar que pelo menos E2 caminha no sentido de construir uma nova aprendizagem, mediada por ferramentas culturais e pela interação com E1 cujos questionamentos exigiram daquela estudante a reorganização de suas ideias a fim de conseguir dar explicações ao colega.

Interações discursivas envolvendo a dupla E5E6

Roteiro Exploratório I

Ao analisar os enunciados dessas estudantes com relação ao regime clássico do IVMZ, constatou-se que não houve interação entre E5 e E6 no sentido de discutirem os resultados experimentais e articularem uma resposta única, mesmo trabalhando em duplas. A estudante E6 foi responsável pela leitura do roteiro e E5 estava em frente ao computador manipulando o *software*. A partir das observações na tela do computador, cada estudante fez suas anotações individualmente⁸² durante o trabalho com o roteiro exploratório I (regime clássico).

⁸² Após o trabalho com o roteiro exploratório I, as gravações foram analisadas com o objetivo de verificar a qualidade do áudio. Mediante a não-interação entre E5 e E6, na primeira etapa do trabalho, ambas foram orientadas no sentido de que deveriam interagir para responder de forma conjunta o roteiro.

Optamos por manter a mesma nomenclatura anteriormente utilizada, identificando os dados obtidos a partir das interações discursivas a que se referem (1, 2, 3 e assim sucessivamente). Mesmo que uma estudante não esteja interagindo discursivamente com a colega, a interação pode se dar com o roteiro, com o *software* e até mesmo com outras vozes discursivas.

Interação 1: Contexto situacional - As estudantes deveriam explicar a formação dos padrões de interferência nos anteparos a partir do cálculo das diferenças de caminho entre as diferentes componentes do feixe de luz *laser*. As figuras 29 e 28 são as respostas dessas estudantes para a questão 6 do roteiro exploratório I.

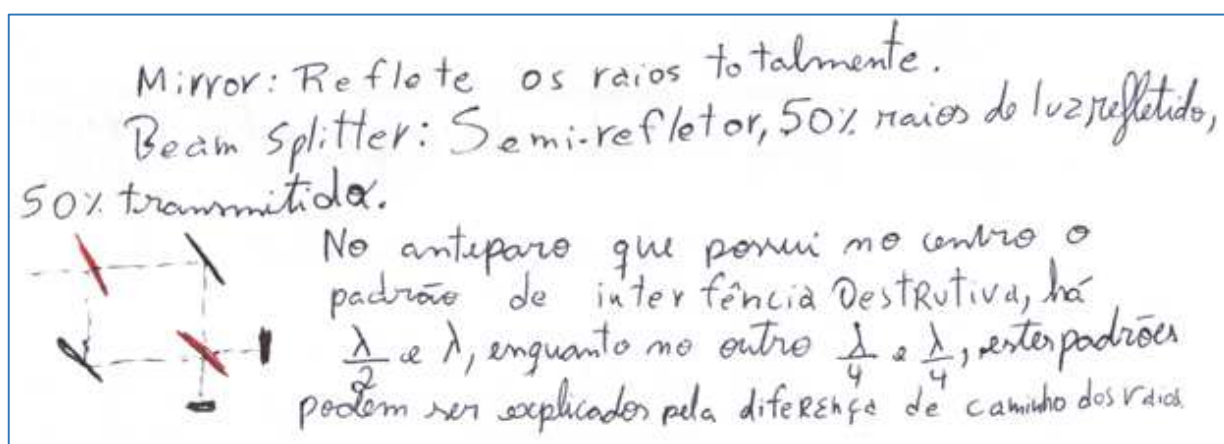


Figura 288: Resposta escrita da estudante E5 à questão 6 do roteiro exploratório I (regime clássico do IVMZ).

Tanto E5 quanto E6, apesar de atuarem de forma individual, conseguiram chegar a respostas satisfatórias para a questão proposta. Enquanto E6 se expressa apenas a partir do aspecto matemático, E5 articula sua resposta conectando os resultados obtidos através do cálculo das diferenças de caminho com o fato de se formarem regiões de interferência construtiva e destrutiva no centro dos anteparos 1 e 2, respectivamente.

Vale lembrar aqui, que as informações sobre reflexão e transmissão da luz nos divisores, bem como sobre as diferenças de caminho resultantes das mudanças de fase eram informadas no roteiro, respectivamente, nas dicas 2 e 3. Desse modo, a formulação das repostas de E5 e E6 pode ser atribuída à interpretação das informações contidas no roteiro exploratório.

$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda}{4}$
 No anteparo 1, na região central os ondas chegam com $\Delta\lambda = 0$, formando um máximo.
 No anteparo 2, os raios chegam com uma diferença $\Delta\lambda = \lambda - \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}$, formando um mínimo.

Figura 299: Resposta escrita da estudante E6 à questão 6 do roteiro exploratório I (regime clássico do IVMZ).

Interação 2: Contexto situacional – No item 7 do roteiro exploratório I, o segundo divisor de feixe havia sido retirado e as estudantes deveriam explicar o papel desempenhado por esse dispositivo. As figuras 30 e 31 representam as respostas dadas pelas estudantes E5 e E6⁸³, respectivamente.

Nele 50% dos raios são refletidos e 50% não transmitidos, porém ele faz a sobreposição dos dois raios que chegam sobre ele.

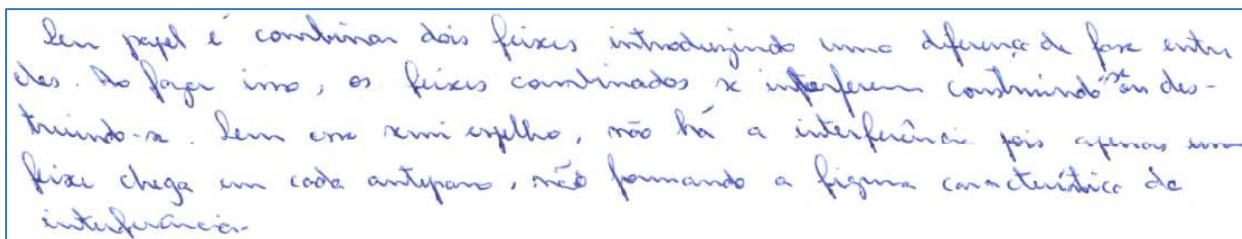
Figura 30: Texto escrito pela estudante E5 para explicar a função do segundo divisor de feixe no interferômetro.

Ambas as estudantes conseguem explicar o papel desempenhado pelo segundo divisor de feixe e, apesar de usarem expressões diferentes, manifestam a mesma compreensão do que está ocorrendo na simulação com luz *laser*. Enquanto E5 se refere à “sobreposição”, E6 propõe que os feixes são “combinados” e que isso resulta no fenômeno da interferência entre ambos.

Identifica-se nas respostas de E6 o uso da expressão “feixes combinados” como uma contrapalavra, carregada de sentido para ela. Apesar de nos permitir pensar em diversas formas de combinação, para essa estudante está claro que essas ‘combinações’ não são quaisquer, mas somente aquelas que resultam em feixes “construindo-se ou destruindo-se”. Já E5 não propõe tantos detalhes em sua explicação,

⁸³ Transcrição da resposta de E6: “Seu papel é combinar dois feixes introduzindo uma diferença de fase entre eles. Ao fazer isso, os feixes combinados se interferem construindo-se ou destruindo-se. Sem esse semiespelho não há a interferência pois apenas um feixe chega em cada anteparo, não formando a figura característica da interferência.”

mas reconhece que deve haver a “sobreposição” das componentes da luz. Apesar de não ser o termo usual para descrever a interferência, “sobreposição” deixa claro que a estudante se refere à superposição das componentes da luz.



Seu papel é combinar dois feixes introduzindo uma diferença de fase entre eles. Ao fazer isso, os feixes combinados se interferem combinando ou destruindo-a. Sem esse semi espelho, não há a interferência pois apenas um feixe chega em cada anteparo, não formando a figura característica de interferência.

Figura 31: Texto escrito pela estudante E6 para explicar função do segundo divisor de feixe no interferômetro.

Considerando as questões 6 e 7 até aqui analisadas nas interações discursivas de E5 e E6, cabe-se perguntar: se não houve interação entre ambas as estudantes, como é que elas conseguiram chegar às respostas? Tentar responder essa pergunta não é trivial. Se recuperarmos a perspectiva bakhtiniana, podemos traduzir o questionamento em: quem está falando? Segundo Wertsch (1993), podemos associar pelo menos duas vozes aos enunciados. Nesse caso, as contrapalavras “sobreposição” e “feixes combinados” podem ser consideradas como a tradução de enunciados anteriores, oriundos de outros contextos, com os quais as estudantes tiveram contato anteriormente. Considerando que tais expressões ainda não haviam sido utilizadas no contexto da atividade, os enunciados poderiam ser atribuídos, por exemplo, à associação dos padrões nos anteparos com figuras de interferência visualizadas em outros experimentos ou até mesmo uma referência mais direta com a interferência em fenda dupla. O fato de não terem interagido entre si não elimina a interação social que tiveram com outras pessoas em contextos que podem ter propiciado mediação semiótica que permitisse a ambas esboçar respostas para os problemas propostos.

Interação 3: Contexto situacional – Nas questões 8 e 9 as estudantes deveriam explicar como a presença de filtros polaroides alterava os padrões nos anteparos, sem o segundo divisor de feixe (BS_2), inicialmente com apenas um polaroide (no caminho A, a 45 graus – figura 12) e em seguida com dois polaroides (acréscimo de um polaroide a 90 graus no caminho B – figura 13). A partir daqui, ao invés de inserir as figuras referentes às

respostas individuais de E5 e E6, optamos pela transcrição das mesmas, sem prejuízo das análises.

E5: Com o polaroide a 45 graus a figura fica um pouco apagada. Uma parte da luz está sendo bloqueada nesse polaroide. O valor significa que ele bloqueia a luz quando está em 45 graus. Quando o polaroide de 90 graus é colocado também a figura some no anteparo 1 porque ele bloqueia toda a luz.

E6: O valor do ângulo significa o ângulo em que ele impede a passagem da luz. O polaroide colocado a 45 graus impede a passagem parcial da luz no lado A e como essa luz só consegue chegar no anteparo 2 a figura fica mais apagada. Quando o polaroide a 90 graus é colocado ele impede a passagem da luz no outro lado e daí apaga a figura no anteparo B. Ele impede a passagem da luz que tá a 90 graus.

Nenhuma das duas estudantes se refere, de forma explícita, à direção do eixo de transmissão dos polaroides, entretanto, ambas têm noção da polarização da luz. Este fenômeno é traduzido como sendo apenas uma absorção, sem que nenhuma das estudantes mencione as características da luz após os polaroides, atendo-se apenas ao que ocorre nos anteparos.

Interação 4: Contexto situacional – O segundo divisor de feixe foi recolocado no interferômetro e, em seguida, as estudantes testaram várias configurações de polaroides com o propósito de atender o roteiro exploratório e tentar compreender o papel destes dispositivos no interferômetro e suas relações com os padrões formados nos anteparos.

Polaroide orientado a 90 graus no braço A (figura 15):

E5: As figuras somem. Isso ocorre porque não tem mais interferência

E6: A figura de interferência que tinha antes fica borrada e bem apagada nos dois anteparos. Isso é porque o polaroide de 90 impede a luz de passar no lado A e daí a luz que sobra (menos luz) é dividida nos dois anteparos.

Ambas as estudantes se referem ao ‘desaparecimento’ da figura de interferência, entretanto, a descrição feita pela estudante E6 vai além e relaciona este fato à atuação

do polaroide, que “impede a luz de passar”. Nessa etapa do roteiro, as estudantes poderiam se certificar que o feixe emitido pela fonte está polarizado horizontalmente, mas não parecem ter percebido tal detalhe. É por isso que a componente A do feixe é totalmente absorvida no polaroide.

Polaroide a 90 graus no braço A e polaroide a 45 graus no braço B (figura 16):

E5: Os dois anteparos estão sem as faixas de interferência e a figura está bem fraca. A luz que chegava antes nos anteparos era bloqueada a 90 graus e agora é bloqueada a 135 graus [soma os dois polaroides].

E6: As figuras dos anteparos ficam iguais quando os polaroides estavam invertidos. A explicação é a mesma de antes. O de 90 graus impede toda a luz de passar e o de 45° impede uma parte, só que agora tem o divisor e a luz é dividida nos dois anteparos. Antes só tinha figura num anteparo, mas agora o divisor envia a luz para os dois. Como só tem luz em um lado não tem a interferência.

As explicações das estudantes na simulação com polaroides se restringem, basicamente, aos aspectos que podem ser observados diretamente na simulação como o desaparecimento dos padrões nos anteparos e a absorção de luz nos polaroides. E5 chega a propor o uso da soma dos ângulos de polarização como tentativa de explicar as observações nos anteparos, entretanto, ao invés de lhe auxiliar, este argumento induz a estabelecer uma relação equivocada onde a absorção no polaroide é diretamente proporcional ao ângulo em que o polaroide esta orientado.

Alteração para 135 graus na orientação do polaroide no braço A (figura 18):

E5: Não há nenhuma mudança. Os dois anteparos estão sem as faixas de interferência e a figura continua fraca.

E6: As figuras dos anteparos desapareceram. Tem duas manchas, só que agora são mais fortes do que quando estavam a 90 e 45. O polaroide de 90 não deixava passar nenhuma luz, mas o de 135 deixa. Na verdade, o de 135 é igual ao de 45, porque somando 90 mais 45 dá 135. As figuras são iguais nos dois anteparos.

E5 novamente se restringe à traduzir a observação dos anteparos em palavras, sem que este consiga associar a direção de polarização com o desaparecimento dos padrões de interferência. A estudante E6, mesmo não conseguindo uma explicação satisfatória, persiste na tarefa e, implicitamente (e, possivelmente, sem ter noção disso) verifica a condição em que os feixes polarizados perpendicularmente entre si não interferem. Entender essa condição é essencial para compreender por que não ocorre interferência nos anteparos.

Com os três polaroides (135 graus no caminho A, 45 graus no caminho B e 90 graus entre o segundo divisor de feixe e o anteparo 1 (figura 19)):

A estudante E5 não respondeu a questão referente à situação obtida com os três polaroides.

E6: A figura aparece de novo no anteparo 1, mas no 2 continua apagada. O polaroide a 135 [graus] faz a figura aparecer de novo, mas ela se fica invertida, destruindo-se no centro.

Conforme pode-se verificar nas respostas de E5, já havia indícios de que essa estudante se distanciava cada vez mais da possibilidade de entender o que estava ocorrendo na simulação. O fato de essa estudante estar agindo de forma individual, sem a presença de um parceiro que pudesse proporcionar alguma assistência e a impossibilidade de mediação com o roteiro exploratório, em função dele conter apenas perguntas nessa fase da simulação, são fatores que dificultam o prosseguimento na atividade. O conflito gerado, no caso de E5, não foi superado e houve o abandono da tarefa.

A estudante E6 encontra-se em situação semelhante em relação à mediação com o roteiro e o *software*. Ambas as estudantes restringiram suas ações ao que era solicitado nos questionamentos e ao não interagirem com o *software* alterando as configurações para além daquilo que era solicitado, subutilizaram o potencial dessa ferramenta mediadora. Conforme já afirmado anteriormente, o *software* é uma ferramenta mediadora em potencial, visto que o caráter mediador está no uso que se faz e não na ferramenta em si.

Roteiro Exploratório II

Para execução desse roteiro as estudantes foram orientadas a trabalharem em dupla e responderem os questionamentos de forma conjunta. A estudante E5 encarregou-se de manipular o *software* e E6 auxiliou trabalhando com o roteiro exploratório.

Interação 5: Contexto situacional – O IVMZ estava emitindo fótons únicos (regime quântico) e ao invés de anteparos foram utilizados detectores (figura 20). Inicialmente, as estudantes deveriam explicar o padrão de detecções obtido (questão 4) e, em seguida, na questão 5, discutir sobre a possibilidade de inferir o caminho tomado por um fóton qualquer e explicar a natureza ondulatória ou corpuscular do fenômeno.

1. E6: Olha, só pisca o azul [detector D_1]!
2. E5: Só ele tá detectando.
3. E6: O outro deve estar estragado então. Hehe!
4. E5: Acho que não óh. Ele [detector D_1] tá detectando tudo que a fonte emitiu.
5. E6: Mas então como que antes chegava nos dois lados [anteparos]?
6. E5: Não sei, mas é isso mesmo. Aqui tá dizendo que o valor teórico e o da
7. simulação é 1 [razão entre o número de fótons detectados em D_1 e o número
8. de fótons emitidos pela fonte].
9. E6: Será que divide aqui e vai só pra esse [detector D_1]?
10. E5: Não sei, pode ser. ... Olha aqui com *laser*. Chega nos dois.
11. E6: Eu tinha explicado aquele negócio lá da diferença de caminho [refere-se à
12. simulação em regime clássico]
13. E5: Eu também, mas tinha nos dois [anteparos]. ... Me::u, com os anteparos fica
14. igual.
15. E6: Então é ondulatório!
16. E5: Sim. ... Escreve aí que tem interferência.
17. E6: ... Dá pra inferir caminho? [a estudante leu parte da questão 5]
18. E5: Não dá. A gente só vê ele chegando. ... Não tem como saber.
19. E6: Mas antes dividia o raio né? [refere-se às componentes da luz *laser* nos braços
20. A e B do interferômetro]
21. E5: Sim, mas não dá pra falar em raio aqui.
22. P: Dá uma olhada aqui. [professor sugere a leitura do roteiro]
23. E6: Feixe colimado.
24. P: E o que isso significa?
25. E6: É tipo um raio, bem fininho.

26. E5: Mas professor, dá pra falar em raio aqui?
27. P: Agora vocês têm que discutir isso.
28. E6: O detector é menor do que o anteparo óh. ... Ele pega só uma partezinha.
29. E5: Bah, acho que é isso então. Aqui onde ele tá não pega nada então.
30. E6: Agora faz sentido.
31. E5: Bota aí que vai pra os dois lados, mas esse detector não pega [detector D₂].
32. E6: E o caminho?
33. E5: Sem chance. Pode vir daqui ou daqui. [braços A ou B]

Os enunciados revelam a dificuldade encontrada pelas estudantes em descrever o fenômeno estudado sem ter uma representação visual que possibilite fazer associação com algo que já conheciam (linhas 3, 9-10). Essa dificuldade se acentuou com a constatação de que as detecções eram coerentes com a previsão teórica (linhas 6-7) e mesmo a visualização das detecções nos anteparos (linha 13) se mostrou insuficiente para que solucionassem o problema (linha 18). A conclusão pela ocorrência de interferência deve-se tão somente à observação dos padrões nos anteparos (linha 15) e o que se percebe em seguida é que houve apenas a emissão de uma resposta, sem compreensão do que estava ocorrendo.

A representação pictórica dos fótons como sendo raios é utilizada por E6 e parece fazer sentido para essa estudante (linhas 19 e 25), indicando uma maior aproximação com uma concepção clássica para explicar o fenômeno. A estudante E5, por outro lado, não compartilha tal noção (linha 21), mas frente a impossibilidade de uma explicação para as detecções põe em dúvida seu próprio posicionamento (linha 26).

O caráter responsivo dos enunciados é marcante na interação entre a dupla e, posteriormente, com o professor. As estudantes, que anteriormente atuaram de forma individual, estabeleceram agora um contexto muito mais rico que possibilita colocar à prova seus posicionamentos (linhas 3-4, 9-10, 19 e 21), o que é muito importante quando se pensa na construção colaborativa de planos de intersubjetividade, e que pode levar à compreensão dos conceitos. Aqui, o IVMZ surge como ferramenta que visa contribuir nesse processo, visto que não se trata de obter imediatamente uma resposta certa para o que é perguntado. A leitura dos enunciados mostra que as estudantes não conseguiram sintetizar uma resposta certa (linha 31), o que é plenamente aceitável dado o estágio inicial em que se encontram no que diz respeito aos conceitos envolvidos.

Interação 6: Contexto situacional – Nas questões 6 e 7, após inserirem um detector demolição no braço A (figura 21) as estudantes deveriam explorar a possibilidade de inferir o caminho tomado por um fóton e a natureza do fenômeno observado.

1. E5: Aqui óh, as luzinhas.
2. E6: Nos três detectores, mas nenhuma pisca junto, óh.
3. E5: Sim, se o verde pega o fóton não tem como chegar nos outros.
4. E6: Beleza é o caminho A.
5. E5: É no A e no B, porque tem uns que ele [detector demolição] não pega.
6. E6: Ah é, pega a metade e divide a outra metade.
7. E5: Sim. É os dois caminhos então.
8. E6: Não, olha a pergunta [estudante lê a pergunta no roteiro]. ... Os fótons que
9. chegam aqui [detectores] não passaram por aqui [caminho A]. Tem o detector
10. aqui que não deixa passar.
11. E5: Sim, era isso que pensei. Tem nos dois caminhos, mas os que chegam até o
12. final [detectores D_1 e D_2] vão pelo B.
13. E6: Beleza. ... Agora quer saber se tem interferência e se é ondulatório ou
14. corpuscular.
15. E5: Sa-ca-na-gem.
16. E6: Bota os anteparos. ... Bah, não tem interferência.
17. E5: Pior. ... Ô professor, tá muito difícil aqui.
18. P: Onde vocês estão?
19. E6: Na sete.
20. E5: É que tem que dizer se é ondulatório ou corpuscular.
21. P: Algum palpite?
22. E5: Sem chance.
23. E6: A gente botou os anteparos e viu que não tem mais as figuras.
24. P: Uhm, as figuras de interferência?
25. E5: Ô meu, é corpuscular se não tem interferência.
26. P: Tá, mas o que é que vem primeiro? A 'não-interferência'?
27. E5: Sim, daí é corpuscular.
28. E6: Não entendi.
29. P: Na verdade não é bem isso.
30. E5: Mas foi assim que a gente descobriu.
31. P: Deixa eu ver o que vocês escreveram ali. ... Olha aqui óh, não é a 'não-
32. interferência' que vocês sabiam por primeiro. Era o caminho.
33. E6: Sim, a gente sabia que era por aqui [caminho B].

34. P: Isso. Estamos chegando aonde eu queria. E se vocês não soubessem o
35. caminho?
36. E5: Como assim?
37. P: Retira o demolição e me diz o caminho.
38. E5: Daí não tem como.
39. P: É isso que estou querendo dizer. O que importa não é a interferência ou a não-
40. interferência. Vejam a dica 2 e pensem em termos de distinguibilidade.
41. E6: Como assim?
42. P: Pensem em termos de informação disponível, de informação sobre caminho.
43. E6: Tô boiando.
44. E5: Tá aqui, óh! [E5 lê a dica 2 no roteiro, onde encontra-se a definição de
45. distinguibilidade]
46. ... A gente sabe o caminho dos fótons que chegaram né?
47. E6: Sim, é pelo B.
48. E5: É corpuscular.
49. E6: Uhm::.

A participação do professor neste contexto enquanto parceiro mais capaz (linhas 21, 24, 26, 29, 31-32, 34-35, 37) das estudantes, com mediação semiótica do roteiro, foi de suma importância para estabelecer um plano de intersubjetividade. Sua atuação possibilitou, pelo menos em relação à estudante E5, a compreensão de um conceito fundamental, que é a distinguibilidade. Essa mediação se deu, inicialmente através de perguntas às estudantes e, posteriormente, pelo enfoque dado a outros aspectos como a 'informação disponível' (que as estudantes já conheciam, mas que não haviam se dado conta) e ao próprio roteiro. Isso significa que não se pode pensar os estudantes atuando unicamente com o *software*, como se fossem descobrir algo sozinhos e isso reforça a importância da utilização do roteiro para além de um questionário.

Nesse diálogo entre E5 e E6, quando se compara os primeiros enunciados (linhas 1-4), onde as estudantes partem de uma indicação visual nos detectores, com enunciados posteriores (linhas 13-14, 16) observa-se que há uma conexão direta entre identificação de caminho e formação de padrões de interferência nos anteparos. Após a introdução do conceito de distinguibilidade como sendo relacionado à informação disponível sobre o caminho, a natureza corpuscular foi atribuída à existência dessa

informação (linhas 46 e 48). Entretanto, isso não garante que E5 tenha adquirido fluência sobre este conceito.

A expressão de concordância de E6 (linha 49) encerra o diálogo. Entretanto, é possível constatar que ela não compreendeu o conceito introduzido pelo professor por meio do roteiro exploratório. Essa estudante parte da formação de padrões de interferência (linha 23) para decidir entre a natureza corpuscular ou ondulatória do fenômeno, mas esse recurso também não lhe é suficiente (linhas 27-28).

Interação 7: Contexto situacional – Na questão 8 do roteiro exploratório II (regime quântico – figura 22) as estudantes deviam classificar o padrão de detecções atribuindo um caráter ondulatório ou corpuscular ao fenômeno, além de relacionar esta caracterização com a distinguibilidade.

1. E5: O que passa pelo [braço] A chega no D_2 [detector 2] e o que passa pelo [braço]
2. B chega no D_1 [detector 1]. .
3. E6: Isso eu também sei, mas tem que acrescentar aqui se é ondulatório ou não.
4. E5: Tá respondido, então. Coloca que é ondu/, corpuscular.
5. E6: Ahan. É um fóton né? Vai ser corpuscular.
6. E5: Nem sempre é assim. Olha lá na outra pra ti ver. ... Na 5 é ondulatório.
7. E6: Ah é, tá errado.
8. E5: Onde? Na 5?
9. E6: É. É corpuscular.
10. E5: Não é isso. Se tu tem a figura é ondulatório. Daí o fóton é onda. Se não tem
11. é partícula.
12. E6: Ahn, tá.
13. E5: Tem que ver o que vai ser detectado antes. Daí tu sabe se é onda ou partícula.
14. E6: Tá, já saquei.
15. E5: Agora tem que ver a distinguibilidade. ... É 1. (...) Aqui [na dica 2] diz que
16. significa que tem total informação disponível.
17. E6: Informação sobre o quê?
18. E5: A trajetória. (...) Vai pelo A e chega no D_2 . Quem vai pelo B chega no D_1 .
19. E6: Hum:.
20. E5: 100 por cento informação.

A estudante E5 conduz o diálogo assumindo o papel de parceiro mais capaz, o qual começa a se consolidar desde os primeiros enunciados e parece se consolidar mais com o *feedback* de E6 (linhas 5, 7 e 9).

No enunciado “Ahan. É um fóton né? Vai ser corpuscular” (linha 5) a estudante E6 expressa concordância com a colega, retomando seu enunciado com a expressão ‘ahan’. Entretanto, procurando compreender e complementar a caracterização do fenômeno observado, utiliza a expressão ‘fóton’ para designar um fenômeno corpuscular. Esse enunciado de E6 expressa uma construção conceitual corpuscular para o fóton independente do contexto experimental. A identificação desta voz de cunho clássico permite dizer que a estudante E6 ainda não tem percepção clara sobre a natureza do fóton, aspecto central explorado no roteiro. Pela forma como E5 faz uso dos recursos semióticos envolvidos, relacionando o padrão de interferência discutido no extrato anterior com a natureza do fóton (linhas 10-11), percebe-se que ela está bem mais amadurecida no domínio desses recursos do que E6, o que a leva a ter mais desenvoltura em elaborar enunciados que possam guiar suas ações mediadas pelo *software*. Seu enunciado também induz a posição responsiva de E6 no sentido de fazê-la aceitar que a natureza ondulatória ou corpuscular do fóton depende do contexto experimental. Nota-se ainda que o fato de E6 aceitar que o fenômeno é ondulatório (linha 12) não pôs fim à discussão.

Parece existir um grande distanciamento entre E5 e E6 no que se refere ao grau de compreensão dos conceitos envolvidos. Enquanto E5 relaciona os conceitos e consegue aplicá-los a diferentes situações, como a caracterização do fenômeno e a associação entre distinguibilidade e o caminho dos fótons, E6 apenas acompanha o roteiro exploratório e manifesta concordância com as proposições da colega, visto pelo enunciados “Ahn, tá.” (linha 12) e “Tá, já saquei.” (linha 14).

Interação 8: Contexto situacional - Após recolocar o segundo divisor de feixe (BS_2) no interferômetro e inserir um detector não-demolição no braço A (figura 23), as estudantes deveriam, nas questões 9 e 10 discutir a relação entre a natureza do fenômeno e a informação disponível.

1. E6: Entendeu?
2. E5: Se tivesse os anteparos a gente ia direto nas figuras, mas como não tem é só

3. olhar a distinguibilidade.
4. E6: É 1 nos dois anteparos.
5. E5: Então, se tem a informação disponível é corpuscular. ... Aqui eu sei que tem
6. fótons no caminho A.
7. E6: Uhu::.

É interessante observar que o conceito de distinguibilidade, que passa a ser utilizado desde a questão anterior no roteiro, assume perante as estudantes um caráter que é apenas substitutivo para situações em que não se tem uma representação dos padrões de interferência (linhas 2-3), para o qual poderíamos até propor uma metáfora de uma bengala para cegos: baseadas apenas no valor da distinguibilidade, concluem que o comportamento do fóton é corpuscular. No entanto, não procuram aprofundar as razões pelas quais isso ocorre, qual o papel do detector não-demolição no processo, entre outros aspectos. Essa concepção de que um comportamento exclui o outro por completo consiste apenas nos casos extremos, em que se tem total informação disponível e visibilidade nula nos anteparos. Por mais que as estudantes tenham respondido de forma bem sucedida a questão, caracterizando o fenômeno como sendo de natureza corpuscular, a justificativa para tal não é suficiente – em casos como esses a análise de interações discursivas é fundamental para elucidar as estratégias (discursivas) dos sujeitos de pesquisa em resolver problemas propostos. Quando E5 menciona que “Aqui eu sei que tem fótons no caminho A” (linhas 5-6), e aparentemente resolve o problema, não está levando em consideração que o detector é não-demolição. Se ele não absorve os fótons e não elimina um dos caminhos (ou seja, não elimina a superposição de estados translacionais adquirida na interação do fóton com o primeiro divisor de feixe), por que motivo o padrão de interferência é destruído?

Toda vez que o detector não-demolição informa que há um fóton associado ao caminho A, ele está codificando essa informação no estado global do sistema fóton e detector (elementos microscópicos do detector), marcando o caminho por uma correlação entre os estados translacionais do fóton com os estados do sistema microscópico que faz a pré-medição (em resumo, se estabelece um emaranhamento entre o estado translacional do fóton e os estados do sistema que realiza a pré-medição). Essa é, na verdade, a informação disponível sobre o caminho associado ao fóton e que foi negligenciada por E5 e aceita por E6. Logo, identificar que a distinguibilidade é máxima não implica, necessariamente reconhecer a natureza da informação disponível.

A medição com um detector não-demolição não é trivial de ser compreendida e isso pode induzir interpretações físicas equivocadas se partir da simples observação do valor indicado para as distinguibilidades nos detectores D_1 e D_2 .

Interação 9: Contexto situacional – Na questão 13, as estudantes deveriam relacionar a natureza do fenômeno com a informação disponível e a visibilidade dos padrões de interferência a partir da utilização de anteparos nas saídas do interferômetro (figura 24).

1. E6: Agora a gente tem tudo: figura e distinguibilidade.
2. E5: E a visibilidade também, aqui. [Provavelmente a estudante tenha indicado a
3. janela *Instruments*, onde são mostrados os valores de V_1 e V_2].
4. E6: Ondulatório.
5. P: Qual o critério utilizado para definir que é ondulatório?
6. E5: As figuras.
7. P: E para que serve saber a distinguibilidade?
8. E5: Só pra saber a informação disponível.
9. P: Ok. Faz o favor de substituir os anteparos por detectores.
10. E agora que não tem figuras?
11. E6: É corpuscular.
12. E5: Ondulatório.
13. P: Decidam-se.
14. [Silêncio]. ... Vamos lá então. Tem informação disponível?
15. E6: Aí não vale professor. Deixa a gente ver ali. [Professor cobriu a janela *Photons*
16. *Counters*, onde são mostrados os valores das distinguibilidade nos detectores].
17. P: Eu sei que vocês já simularam essa condição antes.
18. E5: Tá, não tem como saber o caminho.
19. P: Isso. O máximo que você poderá dizer é que tem aproximadamente metade
20. dos fótons em cada caminho. E isso é a mesma coisa que não ter informação
21. disponível, nem parcial.
22. E5: Ok, me convenceu. É ondulatório.
23. P: Agora relacionem com a visibilidade.
24. E6: Daí a visibilidade é 1.
25. E5: Sim, é o contrário da distinguibilidade.

O enunciado de E5 (linha 6) reforça a concepção de que as estudantes sentem a necessidade de alguma representação pictórica para decidir sobre a natureza do

fenômeno. As informações de visibilidade e distinguibilidade, mostradas na simulação, acabam tendo uma importância menor para as estudantes quando as detecções são representadas nos anteparos (linhas 1-2, 6). O simples fato de não utilizar anteparos e ocultar a informação de distinguibilidade levou a posicionamentos contraditórios, que não passaram de palpites (linhas 11-12). A intervenção do professor, na intenção de trabalhar na Zona de Desenvolvimento Proximal das estudantes e proporcionar assistência para que estabelecessem uma interação discursiva em torno de conceitos (linhas 14, 19-21), buscou guiá-las a superar essa simplificação imposta por E5 e E6, que parece ter auxiliado a relacionar a natureza do fenômeno com a distinguibilidade (linha 22). O mesmo não aconteceu em relação ao conceito de visibilidade (linhas 24-25).

Interação 10: Contexto situacional – Na questão 14 do roteiro exploratório II, após terem substituído os detectores por anteparos, as estudantes foram orientadas a alterar o valor do coeficiente de reflexão do primeiro divisor de feixe para que $R_1 = 0,80$ (figura 25). No processo de construção de uma resposta para esta questão, registrou-se o seguinte diálogo:

1. E6: Essa aí tá na cara, né? A figura ficou mais borrada.
2. E5: É, mas não é isso que tá pedindo. Ele quer saber as implicações em termos
3. de informação disponível. (...) Antes a distinguibilidade deu 1. Agora é 0,6.
4. E6: Quer dizer que eu acerto o caminho de 60 por cento dos fótons?
5. E5: Não é isso. Não é probabilidade. Tem que olhar para a distinguibilidade.
6. E6: Mas a teoria não é probabilística?
7. E5: Não, não é isso. A teoria é probabilística, mas aqui não é isso que tá falando.
8. E6: A distinguibilidade tem a ver com a informação, com o caminho. Eu sei o
9. caminho de 60 por cento das partículas.
10. E5: Lembra que antes falava em informação disponível? Eu não tenho informação
11. bem certa sobre a trajetória, só parcial.
12. E6: Mesmo assim não concordo com isso. Pra mim, se a informação é parcial quer
13. dizer que eu não acerto o caminho de todas as partículas.
14. E5: (...) Diminuiu a visibilidade.
15. E5: Foi de 1 pra 0,8.
16. E6: Tá mais borrada a figura. E o que isto tem a ver com o caminho?
17. E5: Mais informação disponível quer dizer mais distinguibilidade e, por isso, o
18. padrão sai borrado, com menos visibilidade.
19. E6: Hum::, agora tá fazendo sentido.

20. E5: A tua medida causa uma alteração no fóton.

A estrutura do diálogo manteve-se praticamente a mesma, com as duas estudantes participando das discussões, entretanto, E6 agora não demonstra uma simples concordância com os enunciados da colega. Ao contrário disso, toma para si a palavra alheia e a povoa com palavras próprias (linhas 8-9 e 12-13), caracterizando a autoria ao propor novos questionamentos (linhas 4, 6 e 16).

No enunciado “Quer dizer que eu acerto o caminho de 60 por cento dos fótons” (linha 4) apesar de estar equivocada⁸⁴, é possível perceber que alguns conceitos como distinguibilidade e probabilidade estão passando a constituir o horizonte conceitual de E6. Ainda prevalece a ideia de que a FQ é uma mera teoria probabilística, talvez incorporada por vezes presentes em livros didáticos que introduzem muito superficialmente essa teoria, o que pode indicar apenas a interanimação com outras vozes ou que a estudante ainda não compreende o fenômeno da interferência quântica. Nos seus enunciados, como na linha 4 (já citado) e em “A distinguibilidade tem a ver com a informação, com o caminho. Eu sei o caminho de 60 por cento das partículas” esta estudante parece estar convicta de que está correta, o que é reforçado no enunciado “Mesmo assim não concordo com isso. Pra mim, se a informação é parcial quer dizer que eu não acerto o caminho de todas as partículas” (linhas 12-13).

A estudante E5, por sua vez, frente a argumentação da colega, muda de assunto e recorre aos conceitos de visibilidade (linhas 14 e 18) e distinguibilidade (linhas 5 e 17), relacionando os mesmos com a informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons.

O recorte deste diálogo traz ainda um enunciado de E5 onde esta estudante retoma algum enunciado anterior, evocando outras vozes discursivas (provavelmente dos livros didáticos) ao afirmar que “A tua medida causa uma alteração no fóton” (linha 20). Este enunciado além de conferir maior autoridade ao seu discurso, representa a tradução em contrapalavras para a ideia do ‘distúrbio incontrolável’ que a medição causa

⁸⁴ O correto não é 0,6, como mostrado nas equações (17) ou (18). A probabilidade de acertar o caminho associado ao fóton no interferômetro é $P_{is} = (1 + \mathcal{D}_i) / 2$. Se $\mathcal{D}_i = 0,6$, obtém-se $P_{is} = 0,8$, ou seja, é possível acertar o caminho associado a aproximadamente 80 por cento dos fótons.

no fóton, o que estaria em desacordo com o princípio da complementaridade que se deseja interpretar a partir do IVMZ.

Interação 11: Contexto situacional – Na parte final do roteiro exploratório II as estudantes exploraram a relação entre a informação disponível sobre o caminho dos fótons e os padrões nos anteparos, com $R_1 = 0,90$ e $R_2 = 0,10$ (figura 26) na questão 15 e $R_1 = R_2 = 0,10$ (figura 27) na questão 16.

1. E5: Olha só! Tem os dois. Interferência e sem interferência.
2. E5: Dá pra saber o caminho dos fótons que chegam no anteparo 1. A maioria é
3. por B [braço B].
4. E6: Então os que chegam no 2 [anteparo 2] vêm por A [braço A].
5. [Silêncio].
6. E5: Não. Pra os que chegam no anteparo 2 não dá pra saber.
7. E6: Não entendi.
8. E5: Se tu olhar no primeiro divisor tu vai ver que a maioria dos fótons tá no B
9. [toma o caminho B] e quando no segundo divisor a maioria passa direto.
10. E6: É mesmo. A distinguibilidade é quase 1.
11. E5: Isso, porque tu sabe a informação. ... Olha ali a visibilidade. Quase não tem.
12. E6: Então no 2 [anteparo 2] eu não tenho informação.
13. E5: É que os fótons que estão no B [braço B] é muito difícil de refletir e vão pro
14. anteparo 1 e os que são no A [braço A] é muito difícil de refletir também e vão
15. pro anteparo 2.
16. E6: Mas tem menos fótons no 2 [anteparo 2].
17. E5: Sim, é que a maioria está no B [braço B] e passa direto. ... O que interessa
18. não é a quantidade de fótons.
19. E6: Eu ainda me atrapalho um pouco com isso.
20. E5: Se tu sabe a informação é corpuscular. ... E daí não tem a interferência.
21. E6: Sim, já entendi. No 2 [anteparo 2] eu não sei nada.

22. E5: É aquele esquema de novo. Corpuscular aqui e ondulatório no D1.
23. E6: Aqui também vale aquele negócio da distinguibilidade?
24. E5: Todos eles. Distinguibilidade zero no D1 e quase 1 no 2.
25. E6: A visibilidade tá invertida. 1 no D1 e só 0,21 no 2.
26. E5: É. Tá ao contrário.

27. E6: Quanto maior a distinguibilidade, menos visível.
28. E5: Isso. E a maioria passa pelo caminho A.
29. E6: E como que eu calculo essa probabilidade?
30. E5: É só olhar aqui óh. Quer dizer que só 10 por cento dos fótons são refletidos
31. pra o caminho B.

As duas últimas questões do roteiro exploratório II procuraram criar um conflito nas estudantes por meio dos resultados contraintuitivos visualizados no IVMZ, de modo que estas tenham que recorrer à complementaridade onda-partícula para construir uma argumentação capaz de explicar tais resultados. Embora a compreensão deste princípio não seja imediata, o problema apresentado procura explorar novamente a noção de informação disponível sobre os fótons.

A estudante E6 demonstra nos seus enunciados (linhas 10 e 23) que as proposições da colega (linhas 8-9 e interação 10, linhas 17-18) estão sendo incorporadas ao seu discurso e esta mediação com o *software* e com E5 está possibilitando a organização de sua ação durante a atividade. Isso também é evidenciado através do enunciado “A visibilidade tá invertida. 1 no D_1 e só 0,21 no 2” (linha 25), no qual o conceito de visibilidade aparece incorporado no discurso de E6. Além disso, ao complementar sua proposição (linha 27) essa estudante, mesmo sem a mesma profundidade da colega, se apropria de um enunciado anterior (interação 10, linhas 17-18), interpretando-o e incorporando nele a sua voz (no caso, uma contrapalavra).

Quando E5 esboça concordância em relação aos enunciados da colega (linhas 26 e 28), E6 se sente encorajada e convidada a participar do debate, o que acaba potencializando a negociação de significados e, conseqüentemente, ambas evidenciam estar adquirindo um domínio de modo gradativo sobre os conceitos físicos envolvidos (relação entre os conceitos de visibilidade e distinguibilidade, relação desses conceitos com o caráter ondulatório e corpuscular, respectivamente, do objeto quântico, etc.).

Ao final do debate ainda percebe-se que a noção de probabilidade é algo presente e importante para E6. Embora os cálculos de probabilidade sejam importantes, por exemplo, para estimar o número de detecções nos anteparos (linhas 8-9 e 13-15) ou para avaliar as chances de acerto quando se tenta inferir o caminho de um dado fóton, a FQ não pode ser reduzida a um jogo probabilístico. É provável que, para a estudante E6, a complementaridade onda-partícula também passe a ser uma explicação utilizada

(assim como a já utilizada teoria centrada em probabilidades), em um processo de diversificação de uso de ferramentas.

6.5 Interações discursivas na terceira etapa da coleta de dados

Assim como na segunda etapa da pesquisa, os estudantes utilizaram, primeiramente, o roteiro exploratório I (Apêndice E) para reconhecerem os dispositivos presentes no interferômetro e a função desempenhada por cada um, simulando com a fonte operando em regime clássico. Esta atividade teve a duração de 4 horas-aula.

A partir do roteiro exploratório II (Apêndice G), uma semana após a primeira atividade de simulação, os estudantes utilizaram o *software* em regime quântico tomando contato com o fenômeno da interferência quântica. Esta atividade teve duração total de 8 horas-aula e estendeu-se por duas semanas.

Após estas atividades, a sequência da disciplina ocorreu com a introdução à notação de Dirac, à álgebra dos operadores bem como a abordagem dos postulados da FQ. Assim como no ano anterior, esses temas foram explorados recorrendo-se aos dispositivos presentes no IVMZ e à medição com estes.

Ao final da disciplina, ocorreu o estudo dos estados emaranhados. Na atividade com o IVMZ, que teve duração de 4 horas-aula, os estudantes utilizaram o roteiro exploratório III (Apêndice H) e simularam com fótons emaranhados em estados de polarização.

No roteiro exploratório II, usado nessa etapa da pesquisa, houve nova redação de algumas questões no sentido de cobrar que os estudantes comparassem diferentes contextos situacionais e não apenas passassem pelas questões interpretando-as e respondendo-as isoladamente. Em função dessa alteração e também devido o acréscimo do roteiro exploratório III, não há uma correspondência direta entre a numeração adotada para as interações discursivas na segunda e terceira etapas.

Roteiro Exploratório I – Regime Clássico (ver apêndice E)

Esse roteiro é o mesmo que foi utilizado na segunda etapa da pesquisa e visa explorar o IVMZ na situação em que a fonte emite luz *laser*. Durante a atividade com

esse roteiro, o estudante E12 estava manipulando o *software* e sua colega, E11, fazia a leitura das questões e anotava as respostas da dupla.

Interação 1: Contexto situacional – No item 6 os estudantes deveriam explicar a formação dos padrões de interferência nos anteparos a partir do cálculo das diferenças de caminho entre as diferentes componentes do feixe de luz *laser* (figura 10).

1. E11: É só ligar ali.
2. E12: ... É a mesma coisa que fazer com fendas. Quer dizer, é bem parecido.
3. E11: Sim, vou anotar aqui. São figuras de interferência. ... Agora tem que explicar
4. e tem a dica aqui. [A estudante lê a dica 3].
5. [Silêncio].
6. E12: Conseguiu aí?
7. E11: Pra mim tá dando três quartos de λ no anteparo 1.
8. E12: Sim, pras duas componentes.
9. E11; Ah é, esqueci de fazer a do B [braço B].
10. E12: No outro dá λ e λ sobre dois.
11. E11: Isso, isso. Não tinha feito também, hehe. ...E::?
12. E12: É aquele esquema lá. Tu te lembra? Da construtiva e da destrutiva.
13. E11: Sim, em fase e fora de fase.
14. E12: Então bota aí que tão em fase no anteparo 1 e sem fase no 2 [anteparo 2].

Os estudantes demonstraram certa familiaridade com o experimento da dupla fenda, dada a rapidez com que identificaram os padrões obtidos nos anteparos (linhas 2-3) e também pelo fato de lhes parecer algo simples associar as diferenças de caminho por reflexão com a diferença de caminho daquele experimento. O fato de os padrões nos anteparos se complementarem não apareceu nos enunciados desses estudantes.

Por mais que uma das etapas da questão proposta tenha se reduzido à realização de cálculos (linhas 7 e 10), ambos os estudantes conseguem associar os resultados obtidos com o fenômeno físico observado (linhas 12-14). O estudante E12 (linha 12) utiliza o recurso da pergunta retórica como forma de interagir com a colega, onde este não buscou saber se a colega sabia ou não do que se tratava, mas utilizou esse recurso apenas como forma de interação.

Interação 2: Contexto situacional – A partir da simulação sem o segundo divisor de feixe (BS_2), os estudantes deveriam explicar o papel desempenhado por este dispositivo (figura 11).

1. E12: Ops, sem esse divisor não tem figura.
2. E11: Então é ele que faz a interferência.
3. E12: É o jeito.
4. E11: Pega o rascunho ali. ... Agora risca os λ sobre quatro, porque não tem
5. mais o segundo divisor.
6. E12: ... Peraí, se ele não vai mais ter as quatro componentes aqui [nas saídas do
7. interferômetro].
8. E11: Ah é. ... Então tá, só chega uma em cada anteparo e daí não tem como dar
9. interferência.
10. E12: Bah, pior né.
11. E11: O divisor [segundo divisor] divide e junta as componentes.

Aqui, novamente, não se pode atribuir a solução do problema a apenas um dos estudantes. E11 teve a ideia de recorrer às anotações no rascunho e orientou o que deveria ser feito em relação à ação do segundo divisor sobre as componentes da luz (linhas 4-5) e isso possibilitou que E12 (linha 6) se desse conta do que a ausência desse dispositivo implicava. Por fim, E11 parte do enunciado do colega (linhas 8-9) apresentando a resposta ao problema. Pode-se dizer que ambos chegaram à solução juntos, mediados pelo *software* e roteiro.

Observa-se que a função do segundo divisor de feixe é mencionada com o uso da expressão “divide e junta as componentes” (linha 11), o que pode ser considerado como uma contrapalavra que representa a superposição das componentes da luz naquele dispositivo.

Interação 3: Contexto situacional – Nas questões 8 e 9, os estudantes deveriam explicar como os filtros polaroides alteravam os padrões nos anteparos. Para isso, o interferômetro devia permanecer sem o segundo divisor de feixe e contar, inicialmente, com um polaroide no braço A (eixo de polarização orientado a 45 graus, situação mostrada na figura 12) e, em um segundo momento, deveria ser adicionado um polaroide no braço B (eixo de polarização orientado a 90 graus, situação mostrada na figura 13).

Com o polaroide orientado a 45 graus no caminho A:

1. E12: É o ângulo de polarização. Ele polariza a 45 graus.
2. E11: Meio óbvio, né? ... [A estudante lê os demais subitens].
3. E12: É sem o divisor, né? ... Não tem figura.
4. E11: Na verdade tinha que ter uma figura aí. Só que mais fraquinha por causa da
5. polarização.
6. E12: Lê de novo o enunciado da questão.
7. E11: Ah, é que agora não tem aqui, óh, o divisor [segundo divisor de feixe].
8. E12: É o mesmo esquema da outra. Só tem duas componentes, aqui e aqui
9. [o estudante indica os braços A e B].
10. E11: Isso. Mais fraquinha porque polarizou uma parte. ... Deixa eu escrever aqui.
11. E12: Coloca aí também que tá passando menos luz no A [braço A] e daí fica mais
12. fraco [figura com menor intensidade] no anteparo 2.

Após acrescentar o polaroide orientado a 90 graus no caminho B:

13. E12: Apagou tudo.
14. E11: Tá polarizando a 90 agora.
15. E12: Olha aqui óh, colocando e tirando o polaroide de 90. Só muda no anteparo
16. 1.
17. E11: Sim, mas tem que ser isso mesmo. Nesse lado [braço B] só vai luz pro
18. anteparo 1. O 2 [anteparo 2] não tem nada a ver.
19. E12: Que massa! A 90 polariza tudo.
20. E11: Tira o de 45 agora. ...Ó::: ... Lembra dos polaroides?
21. E12: Se tá a 90 não passa.
22. E11: Só se a luz tá na horizontal.

Os estudantes conseguem, parcialmente, reconhecer a função desempenhada pelo filtro polaroide e associar a polarização da luz com a menor intensidade obtida no anteparo 2 (linhas 4-5 e 10). A noção de intensidade aparece nos enunciados através da contrapalavra “mais fraquinha” (linhas 4, 10 e 12). Na linha 10, entretanto, E11 justifica a diminuição da intensidade com o enunciado “polarizou uma parte”, o que é confuso – o correto seria “o polaroide absorveu parte da energia da onda”. Na linha 12, E12 parece reconhecer o fenômeno da absorção da energia da onda pelo polaroide.

O conceito de polarização é facilmente retomado, certamente a partir de outros contextos (linhas 20-21) e os estudantes não apresentam dificuldade em reconhecê-lo

na simulação, mesmo antes dessa ser realizada (linhas 1-2) e de forma parcialmente correta. A mediação com o *software* possibilitou aos estudantes confirmarem algo sobre o qual já possuíam algum conhecimento (linhas 21-22).

O diálogo entre os estudantes é caracterizado pela responsividade dos enunciados, o que confere grande interatividade entre a dupla na realização da atividade.

Interação 4: Contexto situacional – O segundo divisor de feixe foi recolocado no interferômetro e os estudantes passaram a testar várias configurações com polaroides, para que pudessem compreender o papel desempenhado por estes dispositivos no interferômetro e a influência que têm sobre os padrões exibidos nos anteparos.

Com o polaroide orientado a 90 graus no braço A (figura 15):

1. E11: Não devia aparecer nada [nos anteparos]. Tá em 90 [polaroide orientado a
2. 90 graus].
3. E12: É. ... Ah não, tá certo. Agora tem o divisor ali.
4. E11: Ah é! É a luz do B [braço B] que se divide.

Com o polaroide a 90 graus no braço A e o polaroide a 45 graus no braço B (figura 16):

5. E11: Mais fraco, né?
6. E12: Por causa do [polaroide] de 45. Óh, com e sem o de 45.
7. E11: Na verdade ele tá polarizando a luz que chega nos anteparos.
8. E12: Sim, daí enfraquece.
9. E11: Peraí que isso já é na outra pergunta.

Alteração para 135 graus na orientação do polaroide no braço A (figura 18):

10. E12: O::pa! Parece mais forte né?
11. E11: É, mas é só um pouquinho. ... É que agora vai luz desse lado também [braço
12. A].
13. E12: É aquele esquema mesmo. A 90 não vai passar nada. ... Olha com 180.
14. Passa tudo.
15. E11: Bota 270. ... Não passa nada.
16. E12: Mas tinha que dar interferência. ... Tem as quatro componentes de novo.
17. E11: Uhm::.
18. [Silêncio].

19. E11: Tá, mas 135 menos 45 dá 90 e quando tá a 90 não tem interferência.
20. E12: É mesmo, tá certo.

Com os três polaroides (figura 19):

21. E12: Hu::m.
22. E11: Como assim? Não era pra ter nada.
23. E12: Pois é, a 90 não passa.
24. E11: Ai, não sei. Só sei que o que a gente fez antes tá certo.
25. E12: Sim, tá certo.
26. E11: Mas não pode! Como que tem essa figura de novo?
27. E12: Tem alguma coisa no roteiro?
28. E11: Nada, só perguntas.
29. E12: Vamos colocar assim mesmo. Que precisa do polaroide [orientado a
30. 90 graus] para formar a figura nos anteparos, mas que só forma no 1
31. [anteparo 1].
32. E11: Peraí, mais devagar [E11 anota a resposta no roteiro].

Os estudantes conseguiram responder as questões envolvendo dois polaroides sem grandes problemas, exceto quando estes se encontravam com as direções de polarização perpendiculares entre si. Apesar de chegarem a uma resposta, considerada satisfatória pela dupla (linhas 19-20), E11 e E12 não se deram conta de que o padrão desaparece para qualquer outra configuração em que os eixos de polarização estão orientados perpendicularmente entre si. Além disso, parecem ter confundido o fato de que um polaroide orientado a 90 graus absorve toda a energia de luz polarizada na horizontal (como a emitida pela fonte) com a impossibilidade de ondas com polarizações ortogonais entre si produzirem padrão de interferência (linha 19).

Sua análise recai apenas sobre os polaroides e não sobre o efeito que produzem sobre a luz, ao contrário do que já haviam feito antes. Observa-se que as expressões “passa tudo” (linha 14), “não passa nada” (linha 15), “se tá a 90 não passa” (interação 3, linha 21) não têm conexão com o conceito clássico de polarização. Este conceito, sempre que foi mencionado esteve associado à redução de intensidade da luz polarizada (linhas 5-8, 13-15 e interação 3, linhas 4-5, 10-12) sem que fosse mencionado o comportamento da luz após o polaroide.

Neste diálogo, o trecho que se estende da linha 1 até a linha 20, apresenta situações em que as hipóteses dos estudantes se confirmaram com relativa facilidade e quando isso não ocorreu de forma imediata (linhas 10 e 17-18), a dupla logo encontrou uma alternativa, através da mediação com o *software* para responder a questão proposta (linhas 13 e 15). Isso nos leva a retomar aqui o papel do roteiro exploratório que, em alguns momentos, foi utilizado como ferramenta mediadora por E11 e E12 (linha 27; interação 1, linha 4; interação 3, linha 6) mas que não tem a pretensão de solucionar as dúvidas dos estudantes, apenas problematizar os conceitos para que esses busquem construir suas interpretações. No contexto situacional envolvendo três polaroides os estudantes demonstraram que não compreendem bem o conceito de polarização.

Roteiro Exploratório II – Regime quântico (ver apêndice G)

Durante a realização da atividade com esse roteiro exploratório, os estudantes optaram por inverter suas atribuições, de modo que E11 passou a manipular o *software*.

Interação 5: Contexto situacional – O IVMZ está operando em regime quântico e os anteparos foram substituídos por detectores (figura 20). Os estudantes deviam explorar, na questão 5, a distribuição das contagens nos detectores.

1. E12: Acende só no detector azul, porque só ele detecta os fótons.
2. E11: Sim, mas acho que ele [o professor] quer saber mais do que isso.
3. E12: Mas é isso mesmo.
4. E11: Sim, é isso. Mas por que só esse detector consegue captar os fótons?
5. E12: Ah, saquei. Senão parece que só ele é que é capaz de captar.
6. E11: Isso. Na verdade, supondo que os dois [detectores] funcionam, os dois
7. deveriam detectar, né?
8. E12: Pois é.
9. E11: Professor, dá pra tirar o detector e colocar um anteparo?
10. P: Não, por enquanto usem os detectores. Não tem uma dica ali na questão 5?
11. E12: Feixe de fótons colimado. Ah sim, é aquele esquema de um feixe bem fininho.
12. E11: Sim, mas isso adianta o quê?
13. E12: Só vai chegar no meio [centro] do detector.
14. E11: Só no meio [centro] e só no detector 1.
15. E12: É mas o fato de ser colimado não explica porque chega só nesse detector
16. [detector 1].
17. E11: Tá, mas daí tem aquele esquema lá das fases, lembra?

18. E12: Ah é, tinha um negócio assim mesmo.
19. E11: É assim óh: nesse detector [detector 1] os fótons chegam em fase e no outro
20. [detector 2] dá interferência destrutiva.
21. E12: Certo, certo. Chegam fora de fase. Peraí que vou anotar. ... Agora é estranho,
22. né: falar disso pra fótons?
23. E11: Disso o quê: das fases?
24. E12: É.
25. E11: É onda-partícula.

Observa-se, através desse diálogo a grande interatividade entre os estudantes e, em diversos momentos, a estudante E11 contribuiu para isso por meio de perguntas retóricas (linhas 6-7, 17). Mesmo sendo perguntas retóricas, o caráter responsivo dos enunciados fica ainda mais evidente.

O recurso adotado por E11 para explicar a ocorrência das detecções somente no anteparo 1 (linhas 19-20), recorrendo a uma analogia com a óptica ondulatória clássica a partir da retomada de enunciados anteriores (interação 1, linhas 15 e 16) muda a forma de E12 encarar o problema. O movimento discursivo de E12 envolve o questionamento à colega (linhas 15-16) o retorno a um contexto situacional anterior, conforme o enunciado “Ah é, tinha um negócio assim mesmo” (linha 18), a concordância com a explicação dada pela colega (linha 21) e a análise da validade da proposição em debate, no enunciado “Agora é estranho, né: falar disso pra fótons?” (linhas 21-22). A estudante E11, frente ao cenário de dúvida apresentado por E12, se vale do enunciado “É onda-partícula” (linha 25) para conferir autoridade ao seu discurso e convencer o colega. Esse enunciado, remonta a outros contextos que estão além do contexto situacional em questão.

Interação 6: Contexto situacional – A partir da simulação com detectores, já realizada na questão anterior do roteiro, os estudantes deveriam analisar a informação sobre caminho tomado pelos fótons e caracterizar o fenômeno quanto à sua natureza (corpuscular ou ondulatório).

1. E11: Acho que não tem como saber. Pode ter vindo por qualquer caminho.
2. E12: O fóton também pode ter se dividido aqui no primeiro cubinho [primeiro
3. divisor de feixe].

4. E11: É um divisor de feixe.
5. E12: Então, é isso que ele faz.
6. E11: É, pode ser. Anota aí então.
7. E12: Anotar que ele divide ou que pode ter vindo de qualquer lado?
8. E11: Acho que os dois né. Uma coisa leva à outra.
9. E12: ... Óh: como o divisor divide os fótons não há como dizer por onde ele vem
10. [o estudante leu a resposta que havia redigido].
11. E11: Não, corrige ali. Como é dividido, vem pelos dois caminhos.
12. E12: Beleza.
13. E11: Não tem como saber se é ondulatório ou corpuscular.
14. E12: Tem um dica aqui. [E12 lê a dica 2].
15. E11: Sim, mas a distinguibilidade tá zerada nos dois.
16. E12: Bota anteparos ali.
17. P: Ainda tem que ser com os detectores.
18. E11: Com detectores?!
19. P: Seguindo o roteiro, sim. Tu prefere com os anteparos?
20. E12: É que daí a gente vê a formação daquelas figuras.
21. P: E tem mesmo que ver as figuras?
22. E11: É que daí fica mais fácil.
23. P: Ok, vamos fazer um teste então. Continuem com os detectores agora e troquem
24. pelos anteparos somente no item 9.
25. E12: É que daí a gente pode acabar dando uma resposta diferente.
26. P: Só porque não enxergam as detecções?
27. E12: É que fica mais fácil explicar pela figura.
28. E11: É que isso já é meio estranho e sem ver as figuras fica difícil.
29. P: Ok, mas continuem com os detectores até a 9. Se precisar voltar depois a gente
30. volta aqui e analisa de novo então. Não deixem de considerar a dica 2.
31. [Silêncio].
32. E11: Então coloca aí que não tem informação disponível e que a distinguibilidade
33. tá zerada nos dois [detectores].
34. E12: É o jeito né. Mas tu sabe se é ondulatório ou corpuscular?
35. E11: Ainda não.

Nesse tipo de atividade, com ferramentas mediacionais, procura-se criar contextos mais ricos em termos de aprendizagens e o fato de os estudantes atuarem em duplas só tem a contribuir com esse objetivo. Os estudantes entram em contato com

enunciados que, muitas vezes, são contraditórios e isso implica trocas discursivas carregadas de significados tanto para os interlocutores quanto para a pesquisa em si. Isso é ilustrado, por exemplo, nesse contexto situacional vivenciado por E11 e E12.

Pode-se constatar que ambos os estudantes não compartilham a mesma definição de situação. Enquanto E11 considera que o fóton pode estar associado a qualquer um dos dois caminhos possíveis no interferômetro (linha 1), E12 propõe a hipótese da divisão do fóton no primeiro divisor de feixe (linha 2). Assim como no exemplo citado por Wertsch (1984), em que uma criança e um adulto realizam juntos a mesma tarefa, os padrões de ação envolvidos podem ser muito distintos. Os enunciados de E11 e E12 trouxeram à tona essa questão e, caso essa percepção diversa sobre o objeto em estudo (simulação da interferência quântica no IVMZ usando detectores) não fosse colocada em debate, ambos os estudantes poderiam ter continuado realizando a atividade em dupla, mas segundo padrões de ação completamente diferentes.

Para que ambos compartilhem a mesma definição de situação é preciso se estabelecer um processo de negociação entre os interlocutores, entretanto, isso não é algo trivial, visto que se trata de realizar mudanças profundas na forma de representar os objetos e os eventos envolvidos no cenário em questão. Esse processo de negociação entre E11 e E12 se dá em torno da função do divisor de feixe (linhas 4-6), entretanto, ocorreu de uma forma tão superficial que os estudantes, rapidamente, chegaram ao acordo que ambas as condições são possíveis: "... ele divide ou que pode ter vindo de qualquer lado" (linha 7); "Acho que os dois né. Uma coisa leva à outra" (linha 8) e "Como é dividido, vem pelos dois caminhos" (linha 11).

Como pode-se observar, não houve mudanças profundas na forma de representar os objetos e os eventos envolvidos, mas uma justaposição das duas formas de representação. A intersubjetividade entre os interlocutores foi estabelecida, porém isso não concedeu nenhuma garantia de que E11 e E12 solucionassem o problema proposto. Nesse caso, o professor deve atuar como parceiro mais capaz, mediando a ação dos estudantes com as ferramentas culturais a fim de proporcionar que todos compartilhem, em algum nível, a mesma definição de situação.

A intervenção do professor na atividade se dá a partir da impossibilidade de os estudantes caracterizarem a natureza do fenômeno e sugerirem a substituição dos detectores por anteparos. Nesse caso, a substituição apontada pela dupla não diz respeito às potencialidades que teria o uso de outro recurso semiótico (representações

dos padrões em anteparos). Dada a facilidade com que esses estudantes conseguiram associar os padrões nos anteparos com o experimento da dupla fenda em contextos situacionais anteriores usando noções da óptica ondulatória clássica (interação 1, linhas 2 e 12), é possível que fossem induzidos nesse novo contexto a optar por atribuir um ou outro comportamento ao fenômeno apenas em função da figura observada nos anteparos (linhas 20, 22, 27 e 28).

A partir da intervenção do professor, o aspecto a ser analisado deslocou-se da necessidade de visualização de anteparos para a interpretação da distinguibilidade. Como os padrões de ação envolvidos nas definições de situação do professor e dos estudantes são diversos e as mudanças necessárias são profundas, o fato de E11 e E12 não conseguirem caracterizar o fenômeno a partir do novo conceito não é nenhuma surpresa (linhas 32-35).

Interação 7: Contexto situacional – Com a inserção de um detector demolição no braço A (questões 7 e 8, situação mostrada na figura 21), os estudantes foram questionados em relação à inferência do caminho tomado por um fóton e a natureza do fenômeno, além de ter que comparar esse arranjo experimental com o anterior (sem detector demolição).

Qual o caminho tomado por um fóton qualquer que chega aos detectores D1 e D2?

Justifique.

1. E11: Bah, agora os dois tão piscando
2. E12: Peraí que tem mais [prosegue na leitura do enunciado da questão].
3. E11: Metade é detectado no verde [detector demolição] e o restante é dividido nos
4. detectores 1 e 2. Vinte e cinco por cento pra cada um.
5. E12: Tá, deixa eu anotar isso. ... Agora tem que falar do caminho.
6. E11: ... Uma parte vem por aqui [caminho A] e é detectada.
7. E12: Morre aqui, porque é demolição.
8. P: Pessoal, deixa eu me meter um pouco aqui porque agora fiquei com dúvida.
9. Quanto tu diz que 'uma parte vem pelo caminho A' o que tu quer dizer com
10. isso? É uma parte do fóton que é dividido ou um percentual do total de fótons
11. emitidos pela fonte?
12. E11: Bah professor, eu acho que é uma parte do fóton, daí a outra vai pelo
13. outro caminho.

14. P: E tu E2 o que tu pensa sobre isso?
15. E12: Se olhar pra porcentagem tá certo.
16. P: Então teremos $\frac{1}{4}$ de fóton? É isso?
17. E11: Ah professor. Isso tá muito difícil.
18. E12: Mas é uma hipótese né? Por que não?
19. P: Mas eu não disse que não é.
20. E11: Mas pela tua pergunta eu acho que não é isso.
21. E12: Olha aqui óh. O que vem por aqui [caminho A] é detectado aqui [detector
22. demolição] e deixa de existir.
23. E11: Isso.
24. P: Sim, concordo contigo.
25. E12: A outra parte segue esse caminho e é dividida nesse divisor [segundo divisor
26. de feixe].
27. E11: Eu também acho que é isso.
28. P: E aquelas luzes ali piscando?
29. E12: É porque tá detectando.
30. E11: Bah E2, o professor tem razão. Elas não piscam juntas, olha.
31. P: Eu tenho razão do que?
32. E11: Hehehe, não se divide mesmo, senão ia piscar [as luzes] junto nos dois. Não
33. pode dividir o fóton.
34. E12: Ok, mas uma parte da resposta tá certa. Cinquenta por cento é absorvido
35. nesse aqui [detector demolição] e o resto vai pelo outro caminho [caminho
36. B].
37. E11: É. Fótons inteiros, mas se distribui aleatório.

A partir da observação das contagens dos fótons detectados, os estudantes verificaram que “metade é detectado no verde” (linha 3), atribuindo corretamente o caminho A à “metade dos fótons”. Vale lembrar que na interação anterior (interação 6, linhas 2-3 e 6) a hipótese da divisão do fóton foi defendida e passou a compor o repertório discursivo da dupla. A intervenção do professor (linhas 8-10, 14 16 e 28) procurou analisar exatamente esse aspecto, ou seja: qual o real significado da expressão ‘metade dos fótons’ para esses estudantes? Essa intervenção, fortemente marcada pelo seu caráter interativo e semioticamente mediado (pelo *software*, inclusive), ocorreu sem que fossem dadas respostas prontas para os estudantes, mas de modo a questioná-los sobre a validade do modelo que haviam proposto para a ação dos divisores sobre os fótons.

O que se pode verificar a partir dessa intervenção é que a definição de situação compartilhada pelos estudantes incorporou a noção de divisão do fóton e os enunciados são levados adiante tomando essa premissa como verdadeira (linhas 12-13, 15, 18, 25-26 e 29), tendo uma maior persistência por parte de E12. A intervenção do professor, ao menos para E11, parece ter feito sentido (linhas 32-33), uma vez que seus enunciados se aproximam mais na noção de indivisibilidade dos fótons e já apresentam, pelo menos de forma superficial, uma noção de probabilidade de um ou outro evento ocorrer (linha 37). Nesse caso, uma nova definição de situação semioticamente negociada entre o professor e E11 parece ter surgido, criando um plano de intersubjetividade entre ambos.

A noção de divisão de feixe, utilizada de forma coerente com o que de fato ocorre com um feixe de luz *laser*, aqui parece ser levada a cabo pelos estudantes, que a estendem para a noção de divisão de um fóton, o que é fisicamente equivocado. Mesmo que o estudante use esse tipo de interpretação, o *software* claramente não corrobora a noção de divisão do objeto quântico, justamente para que essa ideia possa evoluir para a noção de probabilidade associada aos coeficientes de reflexão e transmissão dos divisores, que transmitem ou refletem inteiramente o fóton em eventos probabilísticos. Assim, faz ainda mais sentido quando se pensa o IVMZ como uma ferramenta mediadora, que pode ser potencializada com o uso de roteiros exploratórios apropriados e a realização das atividades entre grupos de alunos. No contexto situacional em questão, a atuação do professor apenas antecipou uma dificuldade dos estudantes que surgiria com a sequência da atividade, especialmente, quando os coeficientes de reflexão e transmissão fossem alterados na simulação.

Que tipo de alteração é observada nos detectores e como isto pode estar relacionado com o fato de o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular?

38. E11: Acho que é assim óh: antes chegava em um detector só e agora tá chegando
39. nos dois, daí agora é corpuscular. Entendeu essa diferença?
40. E12: Mas porque esse que é corpuscular e não o outro?
41. E11: É que antes tinha uma forma de detecção bem definida. Chegava só nesse
42. detector [detector 1].
43. E11: Tá, mas e daí?
44. E11: Daí que agora a gente tem como saber que eles vêm por aqui [caminho B].
45. E12: Ah, pode ser.

Comparação entre o carácter atribuído ao fenómeno na ausência do detector demolição e após a inserção do mesmo no interferómetro

46. E11: Daí agora já tá respondido.
47. E12: Se essa tua ideia estiver certa né? Mas faz sentido.
48. E11: Eu acho que dá pra deixar assim. Coloca aí: As partículas tem um
49. comportamento aleatório, ou seja, quando a luz não pode escolher o caminho
50. é corpuscular e quando pode é ondulatório [E11 dita a resposta para E12].

A explicação proposta por E11 nos enunciados “antes chegava em um detector só e agora tá chegando nos dois, daí agora é corpuscular” (linhas 38-39) e “É que antes tinha uma forma de detecção bem definida” (linha 41) é bastante confusa e não faz sentido para o colega. Seus enunciados começam a ser compreendidos por E12, somente quando E11, passou a incorporar a noção de distinguibilidade, embora esse conceito não seja mencionado de forma explícita no enunciado “agora a gente tem como saber que eles vêm por aqui” (linha 44). E11 atribui um carácter de aleatoriedade ao comportamento dos fótons (linha 49), para se referir ao fato de, às vezes, ter informação disponível sobre caminho e esta possibilidade parece ser expressa mais em função de uma ‘vontade própria’ do fóton do que em função das alterações no interferómetro que levam à obtenção da informação.

Interação 8: Contexto situacional – O interferómetro encontra-se sem o segundo divisor de feixe e o detector demolição que havia no braço A também foi retirado (figura 22).

Sobre a possibilidade de inferir o caminho tomado por um fóton qualquer detectado em D1 ou D2:

1. E11: Dá pra dizer o caminho, óh.
2. E12: Mas é aleatório.
3. E11: Nem tanto. A escolha de quem vai por um caminho ou outro é aleatória, mas
4. todos que vierem por esse caminho [caminho A] chegam no detector laranja
5. [detector 2].
6. E12: Isso, mas a escolha é ao acaso. ... Olha aqui, não pisca junto mesmo. É o
7. fóton inteiro mesmo.
8. E11: Vai anotando aí. ... Tá bem certinho. Metade dos fótons em cada caminho.
9. E12: Tá.

10. E11: Olha aqui óh: sem esse divisor [segundo divisor de feixe] quem manda é o
11. primeiro.
12. E12: Sim, mas e daí?
13. E11: Daí que antes: o primeiro [divisor] mandava metade para cada caminho e a
14. metade que vinha por aqui [caminho A] era absorvida. A outra metade dos
15. fótons ia conforme o segundo divisor mandava.

Comparação entre a natureza ondulatória e corpuscular em diferentes questões e a forma como concebem a existência dos mesmos:

16. E11: Volta lá na [questão] 6 pra ver o que a gente escreveu lá.
17. E12: A gente não respondeu. ... Ele queria saber se era ondulatório ou
18. corpuscular.
19. E11: ... Tá, agora a gente já sabe. Aquele esquema que eu falei antes tava certo.
20. E12: Qual esquema?
21. E11: Não dava pra saber o caminho, daí era ondulatório óh.
22. E12: Peraí que agora eu me confundi aqui.
23. E11: Óh, com o segundo divisor só o detector laranja [detector 1] detectava e
24. colocando o demolição os dois detectam. ... É aquilo que a gente escreveu
25. antes: o demolição mostra o caminho dos fótons, daí as detecções dos que
26. sobram são aleatórias.
27. E12: Bah, acho que é isso mesmo óh. Ele [roteiro] tá pedindo pra explicar se tem
28. inconsistência. Então é porque tem.
29. E11: Sim, tem sim. Tem que voltar lá na 6 e dizer que era ondulatório, que chegava
30. só no azul [detector 1]. Aquilo era a interferência.
31. E12: Ele [o professor] não disse que tinha que fazer em ordem né.
32. E11: Não. O que importa é que agora a gente já sabe.
33. E12: Tá, então vou escrever que essa é a inconsistência, que antes era onda e
34. agora é corpuscular.
35. E11: Isso.
36. [Silêncio].
37. E12: ... Como que a gente concebe isso? [E2 lê parte da questão proposta no
38. roteiro].
39. E11: É a dualidade onda-partícula. Os fótons têm dualidade.

O aspecto que mais chama a atenção de E12 é o caráter aleatório do caminho tomado pelos fótons (linhas 2 e 6) e, visivelmente, isso não lhe permite compreender

como o fenômeno ocorre (linhas 12 e 22). Para esse estudante, mesmo o aspecto da indivisibilidade do fóton ainda lhe parecia surpreendente (linhas 6-7).

A estudante E11 procura organizar seus enunciados a partir da noção de caminho escolhido pelos fótons no interferômetro (linhas 4, 8 e 13-15, 21 e 25) e isso lhe permite estabelecer relações entre a natureza do fenômeno e a informação disponível sobre o caminho associado ao fóton. Embora o conceito de distinguibilidade não tenha sido mencionado nesses enunciados, as expressões “dizer/saber caminho” (linhas 1 e 21) podem ser consideradas como contrapalavras, carregadas de sentido para E11.

Mesmo que a necessidade de visualizar as figuras nos anteparos como condição para caracterizar a natureza do fenômeno tenha sido, anteriormente, compartilhada por E11, esta estudante conseguiu identificar a ocorrência de interferência de forma indireta, em função de não poder atribuir caminho aos fótons (linha 21). De certa forma, a mediação com o roteiro acaba confirmando essa sua resposta ao questionar sobre a possibilidade de existir alguma inconsistência na caracterização dos fenômenos em diferentes contextos (linhas 27-28). Talvez E11 tenha entendido o termo ‘inconsistência’, presente no roteiro, como se referindo simplesmente ao fato de haver respostas contrárias quando, na verdade, não há inconsistência nenhuma. O que reforça essa hipótese de confusão com o termo é que a própria estudante defende não haver tal inconsistência, uma vez que o enunciado “É a dualidade onda-partícula. Os fótons têm dualidade” (linha 39) pretende justamente resolver o dilema que poderia se instalar.

Assim como no enunciado da linha 25 (interação 5), a expressão “onda-partícula” surge de forma inesperada, desta vez acompanhado por “Os fótons têm dualidade” (linha 39). Novamente, pode-se dizer que essas expressões aparecem de modo inesperado visto que, em ambos os eventos discursivos, não se verificam enunciados que possam conduzir a tal afirmação. Nesse caso, podemos atribuir o uso de tais expressões como sendo a presença de vozes discursivas oriundas de outros contextos socioculturais e que começam a ser povoadas de significado por E11 em contextos situacionais que lhe são propícios.

Comparação entre os padrões observados em diferentes contextos situacionais a fim de relacionar a visibilidade e a distinguibilidade com as alterações em tais padrões

40. E11: Tem que voltar lá na 6 de novo. O que ele [roteiro] pedia mesmo?
41. E12: Visibilidade e distinguibilidade. [E12 lê a dica3].

42. E11: Olhando pra o primeiro divisor não tem como dizer nada aqui. ... Pode ir tanto
43. por um caminho quanto por outro.
44. E12: Olha aqui óh, tá uma figura de interferência bem nítida. A visibilidade é 1.
45. E11: É. Não dá pra saber nada sobre os fótons.
46. E12: Sem chance.
47. E11: Cinquenta por cento de chance em cada caminho é a mesma coisa que não
48. saber nada.
49. E12: Imprevisível. Pode ser tanto um quanto o outro caminho.
50. E11: Isso é a informação. Nenhuma informação. É ondulatório. ... Agora na 8.
51. E12: A gente disse que era corpuscular.
52. E11: Tá. É isso mesmo. A gente tinha a informação do detector e deu 1 pra
53. distinguibilidade.
54. E12: Olha a visibilidade ali. É zero.
55. E11: Ah é. A visibilidade deu zero aqui e a distinguibilidade é 1.
56. E12: Faltou a distinguibilidade lá na 6.
57. E11: É zero.
58. E12: Deu invertido. Ondulatório.

Quando se analisa os enunciados anteriores (linhas 1-39), no caso de E12 verifica-se que o mesmo não está conseguindo acompanhar a tarefa, restringindo-se a passar as orientações do roteiro à colega. Este cenário pouco se altera e as intervenções de E12 não vão além de verbalizar o que está sendo mostrado nos anteparos, informar os valores de visibilidade e distinguibilidade (linhas 44 e 54) ou preencher o roteiro (linhas 41, 51 e 56). Já a estudante E11 procura estabelecer conexões entre os valores das grandezas sob análise com a representação do fenômeno físico (45, 47-48, 50, 52-53). Isso é importante tanto para sua aprendizagem quanto para E12 que, embora consiga fazer apenas algumas comparações entre valores de visibilidade e distinguibilidade (linha 58), pode evoluir discursivamente usando essas comparações como estratégia para, aos poucos, compreender os novos conceitos.

Interação 9: Contexto situacional – Nas questões 11 e 12 do roteiro, os estudantes recolocaram o segundo divisor de feixe e inseriram um detector não-demolição no braço A do interferômetro (figura 23). A partir disso, deveriam propor uma explicação para as alterações nos padrões observados comparando com contextos situacionais anteriores

e discutindo o comportamento dos fenômenos com base no caminho tomado pelos fótons.

1. E11: É corpuscular, que nem na 6. ... Coloca aí que a visibilidade deu zero e a
2. distinguibilidade deu 1.
3. E12: Perfeito.
4. E11: Volta ali [no roteiro] onde ele [o professor] já tinha falado de informação
5. disponível.
6. E12: Era na 6, a dica 2.
7. E11: Então vamos organizar isso de novo. Óh, sempre que a visibilidade deu zero,
8. na 8 e na 9, a distinguibilidade deu 1. Então isso quer dizer que tem total
9. informação disponível.
10. E12: Mas informação sobre o que?
11. E11: Sobre o caminho dos fótons? Na 8 e na 9 a gente consegue saber por onde
12. cada fóton vai, por isso que a distinguibilidade é 1. ... Na 6 não tem como
13. dizer, daí deu zero [a distinguibilidade].
14. E12: Beleza, entendi.
15. E11: Agora tá fazendo um pouco mais de sentido? Distinguibilidade 1 é total
16. informação disponível, daí é corpuscular. ... A gente sabe por onde a
17. partícula passa. ... Se for zero não sabe. ... Não tem como saber o caminho
18. de uma onda.
19. E12: E o não-demolição não mudou nada. Ficou igual ao demolição.
20. E11: A relação da visibilidade com a distinguibilidade sim.
21. E12: Mas o demolição é o contrário do não-demolição e aqui deu a mesma coisa.
22. [Silêncio].
23. E11: ... Não. As figuras ficaram iguais, mas olha aqui as porcentagens.

A estudante E11 conseguiu estabelecer relações entre distinguibilidade e visibilidade que lhe permitem transitar com relativa facilidade entre um contexto situacional e outro (linhas 1-2), pois estas relações não estão restritas à percepção de que o aumento do valor de uma grandeza é acompanhado da redução no valor da outra (linhas 15-18). A organização das respostas que E11 propôs (linhas 7-9) e deu continuidade (linhas 11-13) é que são os aspectos relevantes para E12 (linha 14). Observa-se, com isso, que a mesma atividade, realizada em conjunto pelos estudantes, possibilitou que estes valorizassem de modo distinto os conceitos envolvidos.

Apesar de E11 conseguir utilizar de maneira relativamente fluente, em diferentes configurações do interferômetro, os conceitos de distinguibilidade e visibilidade, a medição com o detector não-demolição pode não ter sido compreendida, visto que esses conceitos são deixados em segundo plano e o foco se volta para os percentuais de detecção nos anteparos.

Interação 10: Contexto situacional – A situação proposta na questão 14 é semelhante àquela que haviam explorado na questão 6 do roteiro, com a diferença de que agora, ao invés de detectores, há anteparos nas saídas do interferômetro (figura 24).

1. E12: Bem, olhando pra o primeiro divisor não tem como dizer nada aqui.
2. E11: Pois é, pode ir tanto por um caminho quanto por outro.
3. E12: Olha aqui óh, tá uma figura de interferência bem nítida.
4. E11: Sim, é isso mesmo. A visibilidade é 1.
5. E12: É, não dá pra saber nada sobre os fótons.
6. E11: Sem chance. Cinquenta por cento de chance em cada caminho é a mesma
7. coisa que não saber nada.
8. E12: Imprevisível. Pode ser tanto um quanto o outro caminho. ... É ondulatório.

No decorrer das interações discursivas, pode-se perceber que os estudantes já atuaram em contextos situacionais mais complexos do que este, que parece não ter despertado nenhum novo questionamento para E11 e E12. Em relação ao estudante E12, este parece esboçar alguns sinais de que relações mais profundas entre os conceitos envolvidos podem ser compreendidas, haja vista a conexão que faz entre a visibilidade do padrão nos anteparos (linha 3), a impossibilidade de inferir caminho e o caráter ondulatório do fenômeno (linha 8).

Interação 11: Contexto situacional – Os coeficientes de reflexão e transmissão do primeiro divisor de feixe (BS_1), foram alterados, tal que $R_1 = 0,80$ (figura 25). Os estudantes deviam, na questão 14, avaliar as alterações ocorridas em termos de informação disponível acerca do caminho tomado pelos fótons e comparar com o caso anterior (em que $R_1 = 0,50$).

1. E12: Não muda nada.

2. E11: Na verdade, ficou um pouquinho mais borrada.
3. E12: Olhando as contagens dá pra ver que tem a metade dos fótons em cada
4. anteparo.
5. E11: Óh, com um detector aqui no meio do caminho.
6. E12: Qual detector?
7. E11: Tanto faz, pode ser o demolição. É só pra saber por onde passa mesmo.
8. E12: Mas daí não resolve nada. A figura some.
9. E11: ... Viu óh, muda. Tem vinte por cento dos fótons nesse caminho [caminho A],
10. porque é o que o detector tá pegando.
11. E12: O resto se divide metade pra cada detector. Quarenta por cento em cada
12. um.
13. E11: Então essa é a informação disponível que ele quer. ... A gente consegue
14. saber pelo valor do R.
15. E12: Tem que se ligar nisso daí agora, porque antes era tudo 0,5.
16. E11: Isso. ... Antes tinha R1 e R2 igual a 0,5, daí tu não tem como saber pra
17. onde vai.
18. E12: Agora tem. Vinte por cento vai por aqui [caminho A].
19. [Silêncio].
20. E12: Mas tu viu que com o detector tu apagou a figura e antes ela só estava meio
21. borrada?
22. E11: É que daí tu tem a informação.
23. E12: Mas tu disse que pelo R dava pra saber.
24. E11: Sim, é que com o detector tu tem mais [informação]. ... Na 14 [questão] então
25. é ondulatório.
26. E12: E o impacto disso [E12 lê o restante da questão].
27. E11: Deu distinguibilidade 0,6.
28. E12: E visibilidade 0,8.
29. E11: O impacto é que tem mais informação e daí fica mais borrada.
30. E12: Continua valendo aquela ideia de antes. Quanto mais distinguibilidade,
31. menos visibilidade.

A partir da observação de que as contagens nos anteparos não se alteravam (linha 1 e 3-4) e que havia uma pequena alteração nos padrões de interferência (linha 2), os estudantes recorrem ao uso de um detector (linha 5) como estratégia. E11, apesar de não ter conseguido relacionar a medição de não-demolição com informação sobre caminho e visibilidade (interação 9, linhas 20 e 23), demonstra fluência na utilização dos

detectores para identificar caminho ao sugerir que “Tanto faz, pode ser o demolição. É só pra saber por onde passa mesmo” (linha 7). E12 também não compreendeu a medição de não-demolição, mas demonstrou preocupação em relação ao tipo de detector a ser utilizado (linhas 6 e 20-21). Quando escrevemos que E11 tem fluência na utilização dos detectores, nos referimos ao fato desta estudante também reconhecer que há implicações quanto ao detector a ser utilizado, mas que para o objetivo que ela quer alcançar, que é apenas certificar-se de quantos fótons são acusados em A (linhas 9-10), isso não é relevante.

Essa medição, realizada por E11, muda o cenário em que se dá o debate, pois ao enunciar que “A gente consegue saber pelo valor do R” (linhas 13-14), os estudantes conseguem relacionar o número de fótons no braço B com o coeficiente de transmissão do primeiro divisor de feixe (linhas 11-12).

As relações entre informação sobre caminho e visibilidade se estabelecem com graus de profundidade distintos para a dupla. E12 discute esses conceitos relacionando-os numericamente (linhas 30-31), enquanto que para E11 as situações caracterizadas como sendo fenômenos intermediários já podem ser explicadas. Isso pode ser observado no enunciado “O impacto é que tem mais informação e daí fica mais borrada” (linha 29), em que E11 consegue relacionar diferentes contextos situacionais. Além disso, essa estudante já consegue identificar quais dispositivos podem lhe fornecer uma quantidade maior ou menor de informação sobre o caminho associado ao fóton, conforme o enunciado “Sim, é que com o detector tu tem mais [informação]” (linha 24) que é utilizado para responder outro enunciado de E12, onde este questiona “Mas tu viu que com o detector tu apagou a figura e antes ela só estava meio borrada?” (linhas 20-21).

Interação 12: Contexto situacional – Os estudantes deviam alterar os coeficientes no divisores de feixe para $R_1 = 0,90$ e $R_2 = 0,10$ (questão 16), situação mostrada na figura 26, e $R_1 = R_2 = 0,10$ (questão 17), conforme mostrado na figura 27, comparando os dois casos em termos de informação disponível sobre o caminho e a natureza do fenômeno.

1. E12: Tem mais fótons transmitidos no primeiro divisor.
2. E11: Tá. Então é como antes. Isso é uma informação disponível. Daí não tem
3. interferência.

4. E12: Acho que não é bem isso. No anteparo 2 a figura de interferência tá bem
5. limpa.
6. E11: É mesmo. Tem interferência e não-interferência.
7. E12: Olha bem aqui na beirada do anteparo 1. Tem um padrão de interferência
8. aqui, mas muito borrado.
9. E11: Isso está muito estranho. Teria que ser igual nos dois anteparos.
10. [Silêncio].
11. E11: Olha, eu acho que agora tem os dois. É onda e partícula.
12. E12: Tu mudou só os índices né?
13. E11: Sim. ... É onda aqui e partícula aqui [E11 deve estar apontando para a tela
14. do computador]
15. E12: Mas antes acontecia um de cada vez.
16. E11: Sim, mas lembra que isso depende do experimento? Aqui é um outro
17. experimento.
18. E12: Isso eu saquei. A mudança dos índices mudou o experimento?
19. E11: O índice de reflexão vai dizer quanto passa e quanto não passa!
20. E12: Ele tá falando a informação disponível.
21. E11: Tubo bem. Essa é a informação disponível. ... Nós sabemos qual a
22. porcentagem dos fótons em cada caminho.
23. E12: Acho que é isso mesmo. Agora tá fazendo mais sentido.
24. E11: Aquele negócio de colocar o detector ali é só para confirmar mesmo. [E1
25. passa para a configuração da questão 17].
26. E12: Ahahaha, agora inverteu. Lá vamos nós de novo.
27. E11: Ops, dá uma olhada aqui óh. O segredo está no segundo divisor.
28. E12: É possível que sim. Mas tem mais fótons no caminho A.
29. E11: Sim, mas não é só essa a informação disponível.
30. E12: E o que mais tem aí?
31. E11: Olha aqui óh. Os fótons do caminho A vão quase todos para o anteparo 2.
32. Tem muita informação disponível. Isso acaba com a interferência.
33. E12: Tá, ok. Mas e o outro anteparo.
34. E11: É o mesmo raciocínio. Essa informação só vale pra um anteparo.
35. E12: Meio esquisito isso.
36. E11: Não. É que os poucos fótons do caminho B, quase nada vai para o anteparo
37. 1.
38. E12: Uhm::.
39. P: Escolhendo um fóton qualquer do anteparo 2, você diria que ele tomou qual
40. caminho?

41. E11: Ah, eu diria que foi o caminho A, pois tem mais fótons nesse caminho.
42. E12: Uhm::, não sei.
43. P: Ok, porque tem informação disponível. Mas isso não serve para o anteparo 1.
44. Vocês não têm condições de inferir porque não têm informação disponível.

A estratégia de E12 para se apropriar das noções de informação disponível e visibilidade, que antes estavam focadas apenas na variação numérica da visibilidade e distinguibilidade começou a se modificar. Esse estudante começa a incorporar aos seus enunciados expressões como “figura ... limpa” (linha 5) e “padrão de interferência ... muito borrado” (linhas 7-8), na forma de contrapalavras usadas para se referir à visibilidade dos padrões de interferência. A contrapalavra ‘borrada’ já havia sido utilizada por E11 (interação 11, linhas 2, 21 e 29). Isso demonstra um aspecto característico da comunicação verbal, que é o de falarmos através dos enunciados de outros interlocutores, num processo de interanimação de vozes discursivas.

As perguntas retóricas (linhas 16 e 18) voltaram a ser utilizadas pela dupla, assim como ocorreu em outros contextos situacionais (interação 1, linha 12; interação 5, linhas 7, 17) auxiliando os estudantes a organizarem seu raciocínio e fortalecendo a interação com o colega. Esse recurso surgiu no diálogo a partir da dificuldade (linhas 4-6 e 9) encontrada para explicar os padrões nos anteparos.

No enunciado “O índice de reflexão vai dizer quanto passa e quanto não passa” (linha 19), o conceito de probabilidade, mesmo de forma implícita, é utilizado como forma de justificar a origem da informação disponível (linhas 20-23). A surpresa de E11 (linha 9) nada tem a ver com a natureza dessa informação, que já era conhecida (linhas 2-3), mas com a aparente dificuldade em conciliar a existência de informação disponível com padrões distintos nos anteparos (linhas 6 e 9). Podemos confirmar isso quando, mais adiante, E11 propõe que a “informação só vale pra um anteparo” (linha 34).

Não é a primeira vez (ver interação 5, linha 25 e interação 8, linha 39) que E11 recorre à noção de onda-partícula, ou onda e partícula (linha 11) para tentar conciliar aspectos contraintuitivos da simulação, como a “interferência e a não-interferência” (linha 6). Mesmo após esse enunciado, é a possibilidade de inferir caminho a partir da variação dos coeficientes de reflexão e transmissão que possibilita aos estudantes a explicação da ocorrência de tais padrões complementares nos anteparos (linhas 27-29, 31-32 e 41).

Como a atividade se aproximava do final e não se espera que os estudantes constatassem sozinhos a complementaridade entre a natureza corpuscular e ondulatória do fenômeno, a intervenção do professor (linhas 39-40) ocorreu no sentido de verificar se os conceitos de distinguibilidade e visibilidade foram compreendidos. Tal aprendizagem se confirma em relação a E11 (linha 41), mas não em relação a E12 (linha 42).

Interação 13: Contexto situacional – Os coeficientes nos divisores de feixe foram alterados para $R_1 = 0,85$ e $R_2 = 0,40$. Os estudantes deviam se posicionar quanto ao significado dos valores intermediários para a distinguibilidade e visibilidade em cada anteparo, quanto a natureza do fenômeno e também sobre a forma como conciliam os padrões obtidos nos anteparos. Os padrões de detecção obtidos pelos estudantes estão representados na figura 32.

1. E11: V1 é 0,61 e D1 é 0,79. ... V2 é 0,81 e D2 é 0,58.
2. E12: É aquilo lá de novo? Quanto mais visível a figura, menos distinguibilidade.
3. E11: Sim, menos informação disponível.
4. E12: Tu viu a visibilidade na 16 e na 17?
5. E11: Não me lembro quanto deu, mas era inversa também. ... Sempre vai ser.
6. [Silêncio].
7. E11: Tem que cuidar que aqui não é zero nem 1.
8. E12: É onda-partícula?
9. E11: Mais ou menos. Na verdade tá mais pra ondulatório do que corpuscular.
10. E12: Sim, mas tem os dois.
11. E11: Sim, em cada anteparo.
12. E12: Vou colocar isso aqui então.
13. E11: Isso. Coloca que tem os dois, mas que é mais ondulatório no 2 [anteparo 2]
14. e mais corpuscular no 1 [anteparo 1].
15. E12: Eu ainda acho que é ondulatório nos dois. ... Olha as figuras. Elas ainda
16. aparecem.
17. E11: Sim, mas essa aqui tá mais borrada um pouco [refere-se às detecções no
18. anteparo 1]. ... Consegue enxergar isso?
19. E12: Sim.
20. E11: E então. É por causa da informação disponível. Pra esse anteparo a gente
21. tem mais informação. A maioria são fótons do caminho B.

22. E12: Tranquilo.
23. E11: Um não exclui o outro. ... Antes era 1 ou zero.
24. E12: Sim, mas ainda era com R igual a 0,50.
25. E11: Quando a distinguibilidade é maior o fenômeno é mais corpuscular e quando
26. a visibilidade é maior é mais ondulatório.
27. E12: Peraí que to anotando.
28. E11: Ah, tua já sabe o resto. ... Aqui a gente tem os dois comportamentos, onda
29. e partícula.

O contexto em que se dá essa interação discursiva busca fazer com que os estudantes reflitam sobre os conceitos de distinguibilidade e visibilidade a partir de valores bem distintos dos casos extremos ($\mathcal{V}_i = 1$ e $\mathcal{D}_i = 0$ ou $\mathcal{V}_i = 0$ e $\mathcal{D}_i = 1$) que haviam simulado. Pelos enunciados de E11, percebe-se que a estudante está bastante segura no que diz respeito aos conceitos envolvidos, pois relaciona informação disponível com visibilidade (linha 3), faz isso para além de simples relações numéricas (linhas 20-21) e consegue justificar a natureza atribuída aos fenômenos (linhas 13-14 e 25-26), chegando a estabelecer, mesmo que indiretamente, a noção de complementaridade (linha 23). A expressão 'onda-partícula', mencionada por E11 como argumento para solucionar alguns aspectos contraintuitivos que se apresentavam ao longo da atividade aparecem agora cheios de significado (linha 28-29). Se antes se tratava de apenas o 'eco' de vozes discursivas pertencentes a outros contextos socioculturais, agora pode-se dizer que E11 começa a ter domínio sobre este conceito.

O estudante E12, que no decorrer das atividades demonstrou dificuldade em compreender do que se tratava a informação disponível e sua relação com a visibilidade dos padrões nos anteparos, restringindo-se basicamente a análises de cunho numérico, começa a esboçar noções mais aprimoradas sobre esses conceitos. Isso pode ser visto pela tentativa que aplicar os conceitos (linha 2), pela disposição em retomar outros contextos situacionais (linha 4) e por começar a defender um ponto de vista (linhas 15-16 e 24).

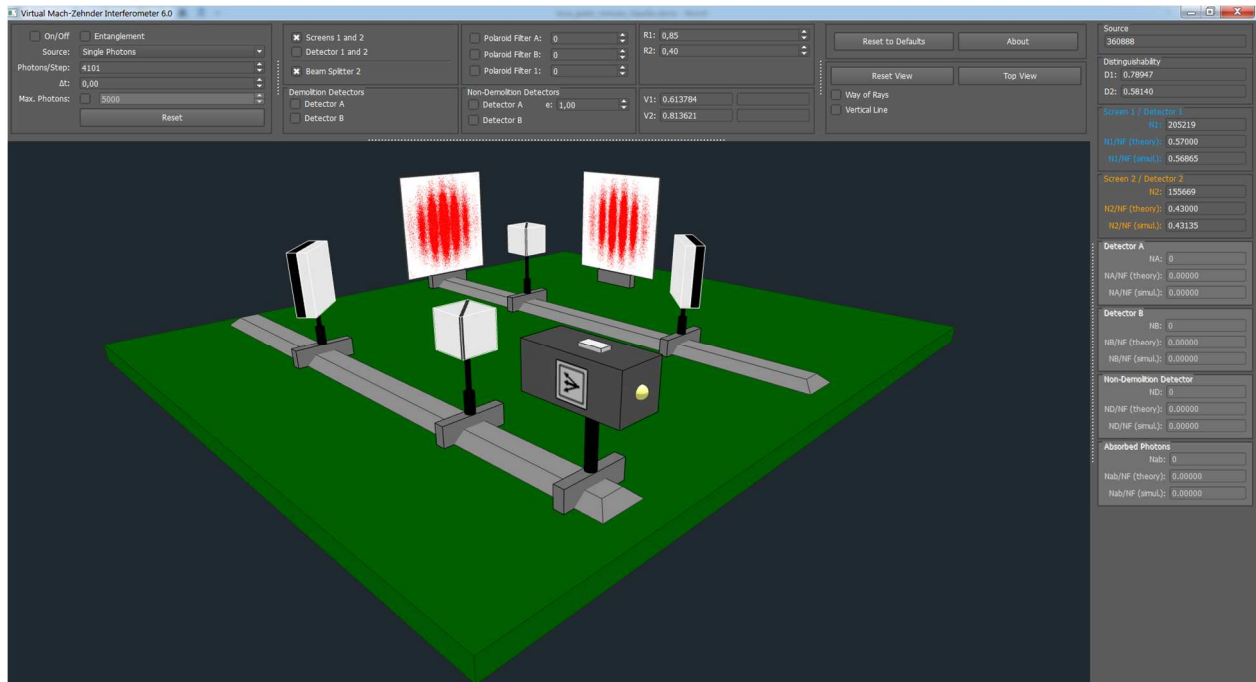


Figura 32: Padrões nos anteparos com $R_1 = 0,85$ e $R_2 = 0,40$. Formam-se padrões com visibilidades diferentes em cada anteparo ($\mathcal{V}_1 \approx 0,614$ e $\mathcal{V}_2 \approx 0,814$). Também são diferentes as distinguibilidades relativas aos anteparos ($\mathcal{D}_1 \approx 0,789$ e $\mathcal{D}_2 \approx 0,581$).

Roteiro Exploratório III – Emaranhamento quântico (ver apêndice H)

Durante a atividade de simulação, os estudantes mantiveram a mesma organização adota no durante o roteiro anterior, ou seja, E11 manipulou o *software* e E12 auxiliou com o roteiro.

Como este roteiro exploratório foi desenvolvido e aplicado apenas na terceira etapa da pesquisa, não há a correspondência numérica com as interações discursivas das outras etapas.

Interação 14: Contexto situacional – A proposta inicial era que os estudantes retomassem o uso de filtros polaroides no interferômetro, uma vez que esses dispositivos já haviam sido explorados na simulação ainda no roteiro exploratório I. A configuração utilizada (questão 4) foi: anteparos nas saídas do interferômetro, $R_2 = 0,50$ e $R_2 = 0,00$, um filtro polaroide orientado a 90 graus no braço A e outro no braço B, orientado a zero graus. Essa configuração e o padrão de detecções obtido estão representados na figura 33.

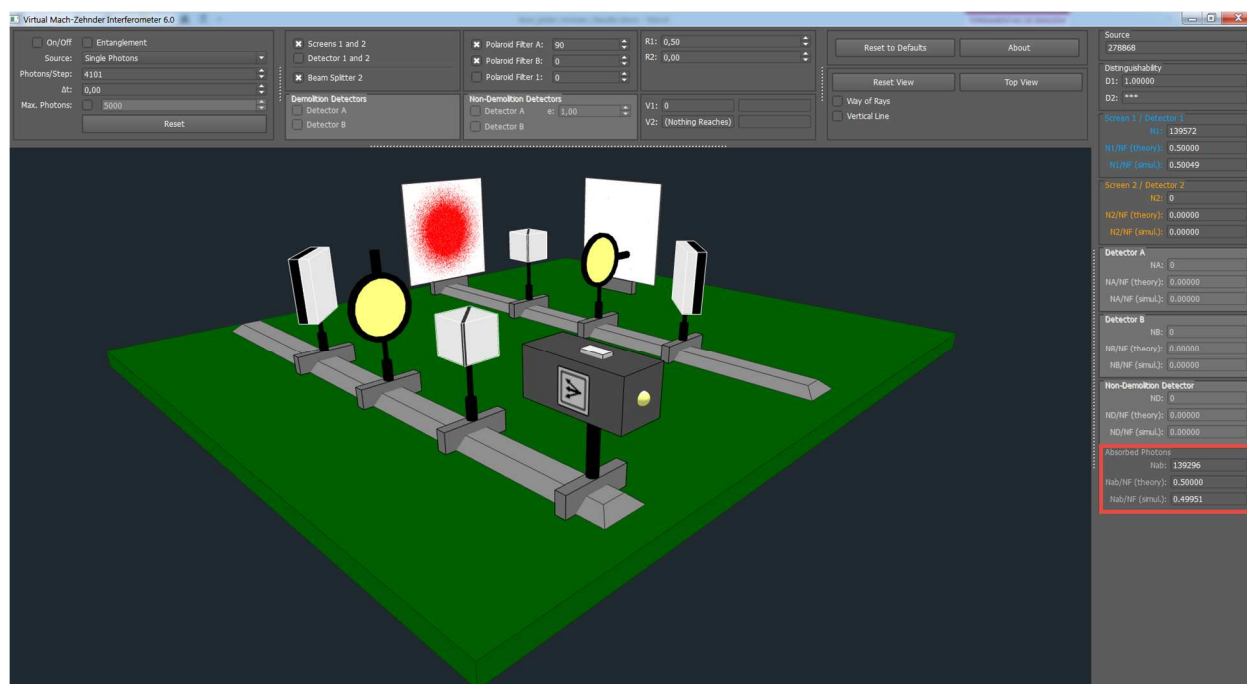


Figura 33: Figuras obtidas no caso em que $R_1 = 0,50$ e $R_2 = 0,00$, com filtros polaroides cruzados nos braços do interferômetro (90 graus no braço A e 0 graus no B). No retângulo vermelho está o campo no qual é registrada a contagem de fótons absorvidos durante a simulação.

O objetivo aqui era que os estudantes revisassem o conceito de polarização. Para isso, deveriam se certificar, inicialmente, que os fótons têm igual probabilidade de reflexão e transmissão no primeiro divisor de feixe. Após a interação com o primeiro divisor de feixe, aproximadamente 50 por cento dos fótons estarão associados ao braço A e o restante ao braço B do interferômetro. Assim, em torno de metade dos fótons será absorvida pelo filtro polaroide, que está orientado a 90 graus. Isso pode ser constatado a partir da observação da contagem de fótons absorvidos (ver figura 33) ou pelo estado de polarização, que é horizontal. Como restam apenas os fótons que tomam o caminho B e $R_2 = 0,00$ (é como se o segundo divisor de feixe não estivesse no interferômetro),

esses são detectados apenas no anteparo 1 (aproximadamente cinquenta por cento do total de fótons emitidos pela fonte) sem formar padrão de interferência.

Com o interferômetro desligado:

1. E11: Cinquenta por cento [dos fótons] pra cada lado.
2. E12: Ahan. Quando o polaroide tá na vertical não é pra passar nada, lembra?
3. E11: Sim, mas se a polarização for horizontal. Se for vertical não passa no
4. polaroide horizontal.
5. E12: Bom, mas isso não tem como saber agora. Vamos assumir que é horizontal
6. [o estado de polarização].
7. E11: Então os fótons vão ser absorvidos aqui no de 90 e sobra só a metade que
8. vai por B [braço B].
9. E12: R2 é igual a zero. Eles vão passar direto.
10. E11: Chega só no 1 então [anteparo 1].
11. E12: É uma informação, né? É corpuscular.
12. E11: Si::m. A distinguibilidade tem que ser igual a 1.
13. E12: Se for polarizado na vertical sobra os fótons do outro lado [braço A] e chegam
14. no anteparo 2.

Como o propósito desse roteiro é o estudo dos fótons emaranhados em estados de polarização, é fundamental que os estudantes tenham claro o conceito de polarização. Os enunciados de E11 e E12 mostram que ambos conseguiram explicar de forma adequada o que havia sido questionado, inclusive criando hipóteses (linhas 3-5) sobre os diferentes resultados que poderiam ser obtidos em função do estado de polarização (linhas 13-14). Os estudantes ainda vão além do que havia sido pensado para a questão, identificando a existência de informação disponível sobre caminho, caracterizando o fenômeno como corpuscular (linha 11) e prevendo o valor da distinguibilidade (linha 12).

Interação 15: Contexto situacional – Após marcarem a opção ‘*Entanglement*’ na janela ‘*Source*’ os estudantes receberam uma breve orientação, a partir do roteiro e do professor, sobre o fato de que a partir daquele momento a simulação ocorreria sempre com pares de fótons. Na questão 7, foi solicitado que a dupla tentasse prever o que ocorreria, nesse novo arranjo experimental, se fossem utilizados polaroides com os eixos de transmissão orientados a zero graus em ambos os braços do interferômetro. Na questão 9, deveriam então realizar a simulação e relacionar o número de fótons emitidos

pela fonte com o número de pares detectados, ou absorvidos, além de verificar se ocorriam detecções simultâneas. Nas questões 10 e 11, os procedimentos foram os mesmos alterando-se, entretanto, a direção do eixo de transmissão para 45 graus em ambos os polaroides. Para as questões 12 e 13, ambos os polaroides foram utilizados com a direção do eixo de transmissão em 90 graus. A disposição dos componentes no interferômetro para simulação do emaranhamento quântico é, essencialmente, a mesma, de modo que apenas a direção do eixo de transmissão dos polaroides precisa ser alterada.

A partir do que já foi descrito até agora (ver seção 3.4), sabemos que o par de fótons é criado em um estado emaranhado dado por (19). Além disso, é importante lembrar que a probabilidade de detecção do par é expressa por $(1/2)\cos^2(\xi_A - \xi_B)$ (EDAMATSU, 2007, p. 7183), onde ξ_A e ξ_B representam os ângulos de orientação dos eixos de transmissão dos polaroides A e B, respectivamente.

Tanto para o caso em que ambos os polaroides estão orientados a zero graus quanto para o caso em que a orientação é a 45 graus haverá uma probabilidade de cinquenta por cento de detecção do par nos detectores. Para os polaroides orientados a zero graus, por exemplo, somente haverá detecção quando o estado de polarização do par for horizontal, o que acontece com aproximadamente, cinquenta por cento dos pares produzidos.

Com os eixos de transmissão orientados a 0 graus

Previsão

1. E12: Tem várias possibilidades aí.
2. E11: Pois é, será que ainda vale dizer que a polarização é horizontal?
3. E12: Não sei, mudou bastante coisa agora. ... Vamos fazer umas suposições e
4. depois a gente confere.
5. E11: Sim. ... Se os dois tiverem na horizontal [estado de polarização dos fótons]
6. vão passar sempre e se tiverem na vertical não passam nunca.
7. E12: Beleza, mas pode tá um na horizontal e outro na vertical.
8. E11: Será que vai ter isso?
9. E12: Sei lá, tudo é possível. Nesse caso só vai passar num lado, onde vai os que
10. tão na horizontal. [Estudante faz as anotações no roteiro].
11. E11: Tem o que ali?

12. E12: Se vai ter detecção simultânea?
13. E11: Isso não. Lembra lá da outra atividade?
14. E12: Ahan. Não pode, não divide.
15. [Silêncio].

Resultado obtido

16. E11: Como assim? A metade!
17. E12: Haha, tava bom demais pra ser verdade.
18. E11: Mas não pode ser a metade, não fecha as contas.
19. E12: É mesmo, tem mais fótons. ... Ah não, são pares. Cada um dá dois.
20. E11: É. Óh, agora é simultâneo, por causa que é um par.
21. E12: Ah é, agora pode.
22. [Silêncio].
23. E11: Já sei, óh. A polarização em cada lado varia.
24. E12: Bo::a.
25. E11: Pega os da direita, óh [braço B]. Se metade das vezes ele [fóton] vier
26. horizontal passa e na outra metade tá vertical e não passa. No outro lado é
27. a mesma coisa.
28. E12: Bah, mas essa pergunta foi pra testar mesmo.

Diante da impossibilidade de inferir o estado de polarização do par de fótons (linha 2), os estudantes propõem três alternativas ao fazerem suas previsões (linhas 1 e 3-4). Em duas dessas possibilidades (linhas 5-6) os fótons são tratados como par (ambos com estado de polarização horizontal ou ambos com polarização vertical). No terceiro caso (linha 7) os fótons são considerados objetos quânticos com estados de polarização independentes (um fóton com estado de polarização horizontal e o outro com polarização vertical), o que implica outra possibilidade de resposta (linhas 9-10). Estas hipóteses surgem a partir da simulação realizada anteriormente com polarizadores e um feixe de luz *laser* (no roteiro exploratório I, com a fonte operando em regime clássico). As possibilidades de absorção e transmissão apontadas pela dupla retomam enunciados de um contexto situacional anterior (interações discursivas 3 e 4 dessa dupla) e também de outros contextos socioculturais. O mesmo acontece quando E11 (linha 13) lembra E12 da impossibilidade de divisão do fóton, tema já debatido na atividade

com o roteiro exploratório II (interação discursiva 7 dessa dupla, nas linhas 12-37). Em resumo, há falas mediadas por roteiros e situações externas à situação proposta, no sentido de tentar compreender a situação nova que foi apresentada.

As expressões de surpresa de E11 (linha 16) e E12 (linha 17) são fruto do resultado inesperado exibido nos detectores. O que inicialmente parece ser um problema de cálculo (linhas 18-19) conduz os estudantes a uma quarta possibilidade para os estados de polarização (linha 23) que, momentaneamente, atende suas necessidades (linhas 25-27).

Com os eixos de transmissão orientados a 45 graus

Previsão

29. E11: Agora que a gente já sabe que a polarização varia eu digo que vai dar metade
30. de novo.
31. E12: Eu também acho isso. ... Só mas ela varia igual. Tipo quando tá horizontal
32. num, tá horizontal no outro. Aqui pede pra explicar.
33. E11: Só copia do outro que é igual. Só vai passar quando tiver a zero.
34. E12: Pois é, mas aqui é 45 [graus]. Não vai passar nunca.
35. E11: Vai sim, o de 45 deixa passar tanto a 90 quanto a 0°.
36. E12: Então vai passar sempre.
37. E11: Não. É igual a luz. Passa em um ângulo diferente e enfraquece a luz.
38. E12: Sim, isso eu sei.
39. E11: Enfraquece porque nem toda luz passa. Aqui é a mesma coisa.
40. E12: Por causa da dualidade? Daí vale pra fótons? Tá certo.

Resultado obtido

41. E11: Te falei, óh. Metade de novo.
42. E12: Beleza. Até que não é tão difícil.
43. E11: Agora não, porque a gente descobriu a polarização.
44. E12: A gente esqueceu de dizer que ia ser simultâneo aqui também.
45. E11: Olha aqui. Aumentando o intervalo dá pra ver bem direitinho.
46. E12: Que show. Passou, passou, não passou.

Com os eixos de transmissão orientados a 90 graus

Previsão

47. E12: Agora vai passar aqueles que estão com a polarização horizontal.
48. E11: A metade dos fótons.
49. E12: Isso, a outra metade fica no polaroide [é absorvida].

Resultado obtido

50. E12: O que foi mesmo que eu te disse? Metade de novo.
51. E11: Legal!

O modelo adotado pelos estudantes, segundo um estado de 'polarização variável', mostra-se útil para fazer a previsão (linhas 29-31 e 46-47) e para explicar (linha 40) os resultados obtidos, necessitando de um ajuste (linhas 31-32) para dar conta de configurações diferentes de polaroides. Esse modelo empírico, embora venha a se mostrar inconsistente para outras situações, conforme veremos mais adiante, representa uma contribuição importante da atividade com o *software* e o roteiro atuando como ferramentas mediadoras. Quando o roteiro fornece algumas orientações e deixa os estudantes livres para interagir com o *software* (linhas 45-46), fortalecendo seu caráter exploratório, criam-se situações que podem levar a interpretações divergentes. No caso de E11 e E12, a ideia de atribuir um estado de polarização variável foi bastante interessante e, até certo ponto, não está muito distante daquilo que será utilizado para explicação do emaranhamento quântico.

Interação 16: Contexto situacional – Os estudantes deveriam, na questão 15, prever o que aconteceria se o eixo de transmissão de um polaroide estivesse orientado a zero graus e o do outro a 90 graus. Na questão 16, deveriam contrastar essa previsão com o que haviam informado na questão 4 sobre um polaroide orientado a 90 graus.

1. E11: Metade, mais uma vez.
2. E12: No lado que tá o polaroide a 0 [graus] passa só os que tã horizontal e no
3. lado que tá a 90 [graus] só passa quem tá na vertical.
4. E11: Isso, metade dos que vão pra direita e metade dos que vão pra esquerda.
5. E12: Se tivesse todo mundo horizontal passava só dum lado e se tivesse
6. horizontal passava só do outro.
7. E11: Sim, a gente tinha pensado assim antes.
8. E12: Agora pede pra comparar com o que a gente disse lá na 4.

9. [Silêncio].
10. E12: Mas não tem nada a ver. Antes a fonte emitia só horizontal. Daí passava tudo
11. no que tava a 0 [graus] e nada no que tava a 90 [graus].
12. E11: Pois é!
13. [Silêncio].
14. E11: Coloca aí que isso depende da polarização que sai da fonte.
15. E12: Bo::a. ... Será que ele trocou a fonte? Antes emitia só de um jeito.

A estratégia adotada pela dupla (fonte com polarização variável) mostrou-se incapaz de ser aplicada a um contexto situacional anterior (linhas 10-11) e a hipótese sugerida para evitar a contradição foi a sugestão da substituição da fonte (linha 15). Desse modo, a contradição desaparece.

Da análise realizada, até o momento, sobre os enunciados nessas interações discursivas envolvendo polaroides e a geração de pares de fótons podemos dizer que E11 e E12 compartilham a mesma definição de situação (linhas 2-6). A intersubjetividade que se estabeleceu, nesse caso, se deu em um nível tal que ambos os estudantes adotaram as mesmas representações para os objetos e eventos e isso lhes possibilitou prosseguir na atividade de forma exitosa. Por outro lado, a definição de situação compartilhada pelos estudantes não ajuda no sentido de resolver o problema ou de criar condições para a abertura da ZDP para algum elemento da dupla. Isso vem à tona quando os estudantes observam as contagens nos detectores na situação em que é gerado um par de fótons e o eixo de transmissão de um polaroide está orientado a zero graus e o do outro a 90 graus.

Interação 17: Contexto situacional – A situação proposta na questão 17 apresentou uma situação que buscava colocar em contradição o recurso explicativo adotado pelos estudantes. Para isso, a dupla precisava analisar uma montagem experimental (ver figura 34), baseada em um experimento mental que consistia no uso de dois polaroides e duas fontes que emitem fótons com mesma polarização (quando uma fonte emite um fóton com polarização horizontal, a outra também emite com polarização horizontal, o mesmo acontecendo com a emissão de um par com polarização vertical). Aproximadamente metade das vezes os fótons eram produzidos com polarização

horizontal e metade das vezes com polarização vertical. Essa situação não é possível de ser simulada no IVMZ.

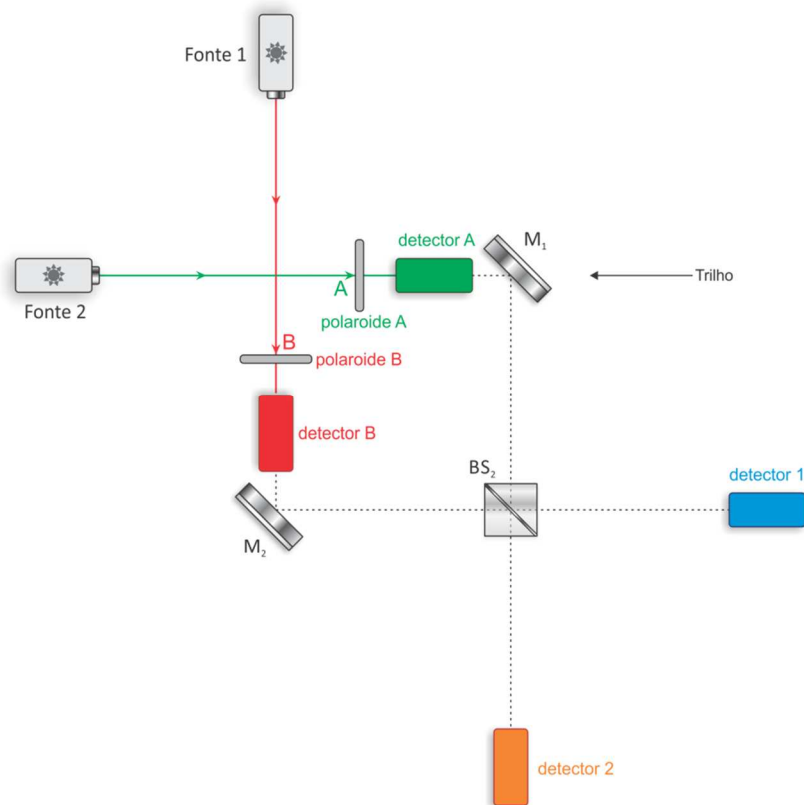


Figura 34: Experimento mental proposto: emissão de uma sequência aleatória do par de fótons, ambos com polarização horizontal ou vertical, de modo que aproximadamente metade das vezes ocorra uma situação ou a outra. Isso é feito a partir de fontes individuais. Nesse caso, os fótons não são emaranhados. Um polaroide está orientado a zero graus e o outro a 90 graus.

Na situação apresentada e mediante as condições de emissão das fontes, a contagem de fótons nos detectores A e B revelaria que a metade do total de fótons emitidos por cada fonte seria detectada após os polaroides. Além disso, não haveria detecções simultâneas, pois se ambas as fontes emitem fótons com o mesmo estado de polarização não há como detectá-los simultaneamente após polaroides que estejam conforme o indicado. Tal situação seria possível somente se os eixos de transmissão dos polaroides estivessem orientados a 45 graus mas, mesmo assim, nem todas as detecções seriam simultâneas (apenas em torno de um quarto delas – nesse caso, a probabilidade de detecção simultânea é bastante distinta do caso em que os fótons estão emaranhados e é dada pelo produto $\cos^2 \xi_A \cos^2 \xi_B$ – essa probabilidade é nula, já que um dos ângulos é necessariamente 90 graus).

1. E12: Parece mais fácil.
2. E11: Uh::m.
3. E12: Não muda nada. Vai continuar sempre dando a metade dos fótons emitidos.
4. ... Olha aqui, óh. Se essa fonte emite horizontal a outra também e daí passa
5. num lado, quando emitir vertical vai ser vertical nas duas e daí passa do outro
6. lado.
7. E11: Isso sim, mas daí não vai passar os dois juntos, só um de cada vez. A gente
8. viu lá que sempre detectava junto.
9. E12: Ah::.. E agora?
10. E11: Tem alguma coisa errada aí.
11. E12: Não pode! A gente testou isso quantas vezes? Umas 3 ou 4 vezes.
12. [Silêncio].
13. E12: A 45 [graus] dá certo. Detecta junto.
14. E11: Como?
15. E12: Aquilo que tu falou antes. Se tá horizontal [estado de polarização] e o
16. polaroide a 45 passa um pouco e se tá vertical [estado de polarização]
17. também passa um pouco.
18. E11: Sim, isso é verdade. ... Mas não resolve. Se passar num pode passar no
19. outro ao mesmo tempo, mas também pode passar num e naquela hora não
20. passar no outro. ... Às vezes vai detectar junto e outras vezes não.
21. E12: Desisto.
22. E11: Professor, é assim mesmo?
23. P: Essa discussão de vocês é interessante. Vocês estavam conseguindo fazer
24. antes disso?
25. E12: Sim, a gente se enrolou nessa.
26. P: Tudo bem, registrem as ideias de vocês aqui, mesmo se acham que está
27. errado. Depois a gente retoma.

Uma grande inquietação se estabeleceu entre os estudantes frente à toda a crença que depositaram sobre uma proposta explicativa elaborada por eles mesmos e que, de repente, se mostrou incapaz de dar conta (linhas 7-9) de uma situação, aparentemente simples (linha 1). Nas linhas 15-17 o estudante E12 se vale de um enunciado da colega (interação 15, linhas 35,37 e 39) em um contexto situacional semelhante (polaroide com eixo de transmissão orientado a 45 graus) como recurso explicativo. Em relação a isso, pode-se ver que E12 conseguiu compreender esse enunciado de E11 e aplicá-lo de modo satisfatório explicando as detecções individuais

quando ambos os polaroides estivessem orientados a 45 graus. Entretanto, isso não era o bastante para uma descrição completa do sistema sob análise. Por outro lado, recorrer a um enunciado de E11 para convencê-la pode representar uma estratégia discursiva interessante, pois leva essa estudante a refletir sobre seu próprio enunciado e, quem sabe, concordar com E12.

Se compararmos os enunciados de E12 (linhas 15-17) com os de E11 (linhas 18-20) pode-se dizer que ambos não compartilham mais a mesma definição de situação. Note que E12 disse “Desisto”, na linha 21, indicando sua dificuldade em lidar com a tarefa.

Interação 18: Contexto situacional – Na questão 18 os estudantes puderam observar no IVMZ as contagens nos detectores para a situação que haviam feito uma previsão (na questão 16). Aqui um dos polaroides está orientado a zero e o outro a 90 graus.

Nesse contexto, o que se observa (já descrito na seção 3.4) é que nenhum dos detectores acusa a detecção de fótons.

1. E11: O que é isso?
2. E12: Como assim? Isso não tá certo. Um deles sempre vai passar.
3. E11: Pois é, tinha que dar metade.
4. E12: Tu mexeu em alguma coisa?
5. E11: Não. Só cliquei ali pra ligar. ... Isso não tá certo, tem que passar.
6. E12: Agora não sei mais nada.
7. E11: Se tá a 0 [graus] vai passar nesse aqui e se tá a 90 [graus] passa nesse. Se
8. tá a 45 passaria um pouco em cada um.
9. E12: Eu não sei. Aqui [roteiro] pede pra explicar.
10. E11: Simplesmente não tem explicação.
11. E12: Vamos deixar em branco?
12. [Silêncio].
13. E12: Tem que dizer se tem alguma contradição com a 4 [questão 4].
14. E11: Contradição total. Como que um fóton a 0 [graus] não passa num polaroide
15. a 0 [graus]? A mesma coisa pra 90?
16. E12: Professor vem aqui.

O aspecto contraintuitivo do fenômeno simulado pelos estudantes foi descrito por E11 a partir da problemática que representa, conforme pode-se observar no enunciado “Como que um fóton a zero [graus] não passa num polaroide a zero [graus]? A mesma coisa pra 90?” (linhas 14-15). Esses questionamentos, que parecem não fazer nenhum sentido e permitem inclusive pôr em dúvida alguns de nossos conhecimentos (linha 6) ou até a execução da simulação (linha 4) são o ponto de partida para discussão do caráter não-local do processo de medição em sistemas emaranhados. Sua compreensão não é trivial e não se esperou que o *software* e o roteiro pudessem, isoladamente, levar a isso. O objetivo foi muito mais direcionado a fazer os estudantes entenderem o grande problema conceitual que tinham pela frente, com a mediação do IVMZ e roteiros. A partir desse ponto, a intervenção do professor é condição *sine qua non* para que os estudantes consigam se apropriar desse fenômeno físico.

6.6 Síntese dos resultados

No que diz respeito ao estudo da complementaridade onda-partícula, dois movimentos discursivos distintos puderam ser observados, os quais contribuíram de forma definitiva para o grau de aproximação dos estudantes daquilo que se desejava problematizar. Os estudantes cujo foco foi a compreensão do conceito de distinguibilidade e sua relação com a visibilidade dos padrões de interferência exibidos nos anteparos conseguiram conciliar mais facilmente o caráter complementar onda-partícula. Por outro lado, para os estudantes cujo aspecto prioritário e, na maioria das vezes, dominante em suas análises eram os padrões de interferência nos anteparos, a natureza corpuscular e ondulatória dos fenômenos foi reconhecida, estritamente, como sendo excludente, exibindo pouca, ou nenhuma, relação entre distinguibilidade e visibilidade. Nesse segundo caso, pode-se identificar o estabelecimento de um ‘ciclo vicioso’ onde a visualização dos anteparos atuou como o elemento indutor das explicações, visto que as ações dos estudantes iniciavam com a observação dos padrões nos anteparos, em seguida conferiam os valores da visibilidade e distinguibilidade para cada anteparo e tentavam compreender a origem da informação disponível. Fracassadas essas alternativas, os estudantes retornavam às observações nos anteparos, sem estabelecer grandes relações entre as diversas representações disponíveis (contagens nos anteparos, formação dos padrões de detecção, probabilidades de reflexão e

transmissão nos divisores de feixe), evidenciando o uso desarticulado de recursos multissemióticos. Tal 'ciclo vicioso' pode ser evidenciado na dupla E5E6 (na interação 5, linhas 17-18 e na interação 9, linhas 5-18).

Entre os aspectos presentes nos movimentos discursivos que foram estabelecidos podemos destacar:

- a) o uso de expressões claras pelo professor P3, demonstrando aderência aos enunciados (diferença de caminho óptico, indivisibilidade de fótons, ... sei exatamente por onde os fótons passaram);
- b) desenvoltura quanto ao uso de ferramentas culturais que ajudaram a organizar melhor as ações da dupla (E1, na interação 2, linhas 4-5);
- c) realização correta de um procedimento matemático, mas sem estabelecer uma conexão deste com o fenômeno (E2, na interação 2, linha 10);
- d) interanimação de vozes, retomando um enunciado do professor (E2, interação 2, linha 19) e utilizando termos científicos para conferir autoridade ao discurso (E11, na interação 5, linha 25 e na interação 8, linha 39);
- e) negociação de significados sendo influenciada pela falta de domínio sobre algumas noções básicas (E2, na interação 3, linhas 23-25);
- f) realização de sucessivas aproximações para elaborar as explicações de um modo mais preciso (E1 e E2, na interação 3, linhas 22-24 e na interação 4, linhas 5-6, 27, 33-34, 37 e 50);
- g) dificuldade em conciliar os caracteres ondulatório e corpuscular (E1 e E2, na interação 5, linhas 13-14 e na interação 7, linhas 3-5);
- h) uso de estratégias para o estabelecimento da posição de parceiro mais capaz pelo estudante que manipulava o *software*, como a realização de alterações deliberadas nos dispositivos do IVMZ pelo estudante E2 (interação 5, linha 6), retomada de enunciados do professor (interação 5, linhas 3-4) e auxílio ao colega no processo de compreensão do fenômeno em estudo (interação 6, linha 2);
- i) o caráter dialógico das interações entre os estudantes (E1 e E2, na interação 6, linhas 4-12 e E5 e E6, na interação 3, linhas 3-22) e uso dos diversos elementos mediadores para o estabelecimento de um plano de intersubjetividade (interação 9, linhas 1-10);

- j) evidências de dificuldades para interpretação do conceito físico (E1 e E2, na interação 8, linhas 4, 8-9, 11, 13-14 e 17-18);
- k) atuação do professor com mediação semiótica do roteiro exploratório para o estabelecimento de um plano de intersubjetividade (E5 e E6, na interação 6, linhas 24-43 e na interação 9, linhas 9-22);
- l) incorporação de novos elementos ao discurso, como a noção de probabilidade (E11, na interação 12, linhas 19, 21-22);
- m) construção de um modelo explicativo (E11 e E12, na interação 15, linhas 2-10, 16-18 e 23-27);
- n) testagem de um modelo explicativo a partir do compartilhamento da mesma definição de situação (E11 e E12, na interação 15, linhas 29-32, 41-43 na interação 16, linhas 2-7 e interação 17, linhas 3-8);
- o) fracasso de um modelo explicativo (E11 e E12, na interação 18, linhas 1-10).

A análise desses movimentos discursivos permitiu identificar que os estudantes empregaram um gênero discursivo primário, baseado na comunicação verbal espontânea, como é característico em situações de sala de aula em que estes interagem entre si. O professor, por sua vez, empregou um gênero discursivo secundário ao se comunicar com os estudantes, procurando organizar o processo comunicativo de modo a incorporar elementos próprios do gênero discursivo científico.

A tentativa de aproximação entre os distintos gêneros utilizados se deu através do roteiro exploratório. Entretanto isso não foi feito de uma forma abrupta, mas gradual, a partir da interanimação de vozes (voz dos livros didáticos ou de outros professores) e com os estudantes recorrendo à associação de contrapalavras para interpretação e explicação dos fenômenos observados. Esse processo não se trata apenas de rebuscar o discurso com termos específicos da ciência, conferindo autoridade ao mesmo, mas utilizar os conceitos e termos específicos dentro das suas potencialidades e representações conceituais individuais, o que parece ter sido alcançado satisfatoriamente em boa parte das interações.

As vozes discursivas (ou as visões de mundo) veiculadas pelos livros didáticos e por professores de outros contextos se fizeram presentes nos enunciados dos estudantes em diversos momentos, principalmente quando foi necessário recorrer a termos específicos da ciência, em abordagens comunicativas caracterizadas por um

discurso de autoridade. Termos como, ‘experimento da dupla fenda’, ‘interferência’, ‘diferença de caminho’, ‘feixe colimado’, ‘distinguibilidade’, ‘medida causa uma alteração no fóton’, ‘o fóton tem dualidade’ foram utilizados para concluir uma explicação, conferindo credibilidade a ela ou simplesmente como enunciados curtos, de caráter retórico.

Em relação à associação de contrapalavras, expressões como “sobreposição”, “feixes combinados”, “ruído”, “figura bem suja” tiveram um papel determinante nesse estudo quanto ao fato de possibilitarem que os estudantes fossem, aos poucos, construindo estratégias discursivas para compreenderem os conceitos envolvidos nos temas explorados. Foram essas contrapalavras que possibilitaram que o elo de comunicação dos estudantes entre si, com o *software* e roteiros (como recursos mediacionais) fosse mantido.

Como pode-se observar, as situações analisadas mostram que as palavras utilizadas pelos estudantes, na forma de contrapalavras, desempenharam um importante papel na compreensão dos conceitos envolvidos. As contrapalavras permitiram estabelecer um elo entre aquilo que era exibido pelo *software* e a forma como era interpretado pelos estudantes, o que nem sempre é acessível ao pesquisador. Isso permitiu, inclusive, verificar a dificuldade encontrada pelos estudantes para explicar o fenômeno da polarização. Ao atribuírem unicamente uma noção de ‘desaparecimento da luz’ para esse fenômeno os estudantes acabaram focando em um aspecto específico do fenômeno que não era o mais importante em algumas situações, visto que havia tanto componente da luz transmitida quanto absorvida.

Outro exemplo reside no reconhecimento dos fótons como “bolinhas” que, na percepção de um estudante, pode representar algo coerente e suficiente, mas que dificultou o entendimento mais profundo, como a tensão entre os comportamentos corpuscular e ondulatório do fóton, imprescindíveis para a compreensão da importância teórica da complementaridade onda-partícula. Assim, tem-se também uma situação onde as contrapalavras acabam funcionando metaforicamente como lentes, por meio das quais os estudantes reconhecem os fenômenos explorados.

Ainda em relação às contrapalavras, uma análise longitudinal das interações discursivas possibilitou, por exemplo, entender que o estudante E5 não necessariamente compartilhava de um modelo semiclássico para o fóton. Ao contrário disso, parece tê-lo

concebido mais para concordar com a colega e manter um elo comunicativo do que para sanar alguma dificuldade interpretativa.

A adoção de um modelo clássico para o fóton, por parte de E1 (interação 6, linha 8) e de um modelo semiclássico por E2 (interação 6, linha 9), exige retomar os conceitos de 'definição de situação', intersubjetividade e mediação semiótica (WERTSCH, 1984). Apesar de E1 e E2 estarem trabalhando na mesma atividade e com os mesmos recursos, ambos não compartilham a mesma definição de situação. Por outro lado, o fato de compartilharem a mesma definição de situação não é uma garantia de que as estratégias utilizadas conduzam à aprendizagem dos conceitos em questão, como aconteceu com E11 e E12 (interação 15, linhas 5 à 10). No caso da dupla E1E2, para que E1 assumisse uma definição de situação condizente com um modelo quântico para representar o fenômeno em questão seria necessária uma reconstrução completa na sua definição de situação. Conforme já escrevemos, essa mudança é profunda e de natureza qualitativa, uma vez que não se trata apenas de um acréscimo de conhecimento, mas de uma mudança radical na forma de representar os objetos e os eventos envolvidos nesse cenário.

Quanto às interações discursivas, além de analisarmos os enunciados, interanimação de vozes e uso de contrapalavras julgou-se necessário introduzir o contexto extraverbal dos interlocutores como elemento importante, visto que é este contexto que permeia toda a interação discursiva e dá sentido aos enunciados. O que se pode observar é que o contexto extraverbal, considerando os elementos que foram apresentados na seção 6.3 praticamente não aparecem nos enunciados, tanto os que dizem respeito ao contexto institucional quanto ao contexto sociocultural. Isso não significa que as interações discursivas sejam desprovidas de elementos contextuais, ao contrário, podem haver outros aspectos importantes que não foram levados em consideração na caracterização que realizamos. Por outro lado, deve-se considerar que o fato de os estudantes E1E2 e E11E12 encararem, inicialmente, o roteiro exploratório mais como um jogo de perguntas e respostas do que como um guia e E5E6 pouco interagirem entre si e com a simulação, podem ser elementos representativos que permitam inferir que tal comportamento pode ter sido influenciado pelo contexto escolar com o qual estavam habituados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este texto procurou apresentar uma pesquisa, realizada a partir de três intervenções didáticas, voltada ao estudo de conceitos da FQ no contexto da formação de professores de Física e que buscou discutir à luz da teoria da mediação de Vygotsky e da filosofia translinguística de Bakhtin aspectos presentes no movimento discursivo de estudantes atuando com ferramentas mediacionais. O trabalho realizado pelos estudantes partiu de um contexto situacional da Física Clássica e evoluiu para o estudo de conceitos da FQ.

Em se tratando de uma pesquisa realizada sob um enfoque sociocultural, não cabe fazer comparações no sentido de afirmar que um estudante aprendeu mais do que o outro, mas de analisar as estratégias discursivas envolvidas (o processo é o foco da investigação, não necessariamente os resultados). O movimento discursivo realizado pelos estudantes, para compreensão dos conceitos envolvidos, se estabeleceu a partir do uso de diferentes alternativas: associação de contrapalavras, adoção de um modelo clássico para o fóton, contestação e questionamento dos enunciados do colega, mediação com o roteiro exploratório, interação com o professor, interanimação de vozes, uso de outras alternativas (desenho do interferômetro como recurso semiótico complementar ou até a obtenção de resposta com outra dupla) e interpretação probabilística da FQ. Esse movimento foi facilitado, em todos os contextos, pela manipulação do *software* que, ao ser utilizado enquanto ferramenta cultural, possibilitou aos estudantes fazerem alterações deliberadas na configuração dos dispositivos e, com isso, determinar as estratégias que seriam adotadas. Dessa forma, o estudante que manipulava o *software* obtinha a seu favor as condições necessárias para questionar o colega e, na maioria das vezes, confirmar suas hipóteses, contribuindo positivamente para o trabalho da dupla e assumindo certa liderança.

A analogia estabelecida prontamente com a óptica ondulatória clássica, também foi um elemento que contribuiu positivamente no trabalho dos estudantes, servindo não só como ponto de partida para interação com o *software*, mas também possibilitando a criação de situações conflitantes de grande relevância para todo o processo como, por exemplo, a medição com detector não-demolição e a atuação dos filtros polaroides sobre fótons emaranhados em estados de polarização. Situações como essas auxiliam a reconhecer a necessidade de superação de concepções clássicas para compreensão de

aspectos intimamente ligados à natureza quântica. No caso do IVMZ, certamente não é o acréscimo de noções clássicas que vai permitir aos estudantes realizarem a transição desejável dessas noções aos conceitos quânticos.

Quando nos referimos à atuação dos recursos didáticos na ‘criação’ da Zona de Desenvolvimento Proximal dos professores em formação, estamos nos referindo ao estabelecimento de um plano inicial de intersubjetividade entre os interlocutores, o que é um ponto de partida de fundamental importância nos processos de ensino. Na nossa pesquisa pode-se inferir que esse plano de intersubjetividade ocorreu em um nível intermediário na maioria das interações, sendo facilitado pelo uso dos recursos didáticos que contribuíram para um processo de negociação da definição de situação intersubjetiva. Por outro lado, quando se trata de analisar a compreensão de conceitos, não se pode tomar como único critério o compartilhamento de uma mesma definição de situação e o estabelecimento da intersubjetividade, sob o risco de falsas impressões de aprendizagem por parte dos estudantes. Nesse sentido, Rommetveit (1968) cita um exemplo interessante. A esposa vai até uma loja de autopeças comprar um carburador para o carro do marido. Embora esta não tivesse uma ideia clara do que fosse essa peça, ou seu papel no funcionamento de um carro, ao mencionar “um carburador para o *Ford Falcon* ano 1960” para o atendente este soube exatamente do que se tratava e poderia até selecionar com precisão a peça solicitada a partir da análise das diversas caixas e etiquetas disponíveis (ROMMETVEIT, 1968, p. 268). De forma semelhante, o atendente poderia não estar certo de como seria tal carburador mas, mesmo assim, realizaria a venda com êxito.

Analisando esse exemplo à luz das interações discursivas, é possível que se tenha uma cadeia comunicativa longa e eficiente, mesmo que alguns elos intermediários sejam deficientes (ROMMETVEIT, 1968). No caso da simulação com o IVMZ, não é o simples fato de os estudantes mencionarem a palavra distinguibilidade em seus enunciados ou classificarem corretamente os fenômenos a partir de sua natureza corpuscular ou ondulatória que garante que estes conceitos estejam perfeitamente claros e tenham se articulado no plano intrapsicológico, ou seja, que tenham sido internalizados. Nesse sentido, voltamos a defender a análise das contrapalavras como sendo elementos essenciais para que seja possível verificar quais os significados que realmente existem por trás das expressões utilizadas nos enunciados dos estudantes.

A pesquisa que realizamos traz contribuições importantes no que diz respeito à formação de professores de Física, sinalizando para aspectos que precisam ser levados em consideração para promoção de formações mais sólidas no âmbito da FQ. A partir das análises realizadas, verificou-se que os estudantes têm grande dificuldade em adentrar no universo dos fenômenos quânticos, uma vez que ainda estão arraigadas noções da Física Clássica, estabelecendo-se uma tensão entre a manutenção de visões antagônicas e a adoção de uma visão não clássica dos fenômenos tratados. O estudo da FQ a partir de conceitos fundamentais, como os que exploramos na pesquisa, pode contribuir para que esse dilema seja resolvido de forma bem sucedida. Por exemplo, o caráter corpuscular atribuído aos fótons, pensamento adotado por alguns dos estudantes envolvidos na pesquisa, se estabelece possivelmente como um grande obstáculo para que esses compreendam os fenômenos intermediários, os quais permanecem como uma situação conflitante, ainda não resolvida. Para outros estudantes a complementaridade onda-partícula passou a compor um nova classe de conceitos. A noção de não-localidade, necessária para a compreensão do emaranhamento quântico, mesmo que não tenha sido plenamente reconhecida pelos estudantes, proporcionou diálogos interessantes, em que estes tentaram sofisticar seus modelos explicativos de diversas formas a fim de conseguirem dar alguma explicação plausível para este fenômeno.

Na revisão da literatura que realizamos, é importante relembrar que esta sinaliza para a necessidade de realização de mais estudos que envolvam recursos computacionais para ensino da FQ. Levando esse aspecto em consideração, juntamente com os nossos resultados de pesquisa, consideramos que o trabalho com o IVMZ não se encerra aqui, de modo que novos estudos poderão ser realizados, além de modificações nos roteiros exploratórios. Não foram abordados tópicos que envolvam o uso de polaroides no regime quântico (por exemplo, o apagador quântico ou o estudo da complementaridade mediante uso de polaroides, que podem funcionar como marcadores de caminho) ou o uso mais intensivo dos detectores não-demolição, que possuem eficiência variável. Outros aspectos físicos ainda podem ser implementados no IVMZ (por exemplo, preparação de fótons em estados mistos e a evolução desses estados no interferômetro, desigualdades de Bell). Há ainda a possibilidade futura de explorar melhor as questões vinculadas à linguística, como a multissensibilidade necessária para comunicar e entender os conceitos e fenômenos envolvidos nas tarefas, dando especial

ênfase às relações entre os diversos recursos semióticos utilizados nas explicações dos estudantes (intersemiose). Por exemplo, como a linguagem verbal interage com o formalismo matemático no sentido de formar uma unidade conexa que explica determinados fenômenos no interferômetro? Não é uma pergunta simples de ser respondida e é merecedora de atenção em um futuro próximo, entre outras questões.

REFERÊNCIAS

ACZEL, A. D. *Entanglement: The greatest mystery in Physics*. New York: Four Walls Eight Windows, 2001.

ALLEN, L.; BEIJERSBERGEN, M. W.; SPREEUW, R. J. C.; WOERDMAN, J. P. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Physical Review A*, v. 45, n. 11, p. 8185-8185, June 1992.

ANJOS, R. M.; FACURE, A.; LIMA, E. L. N.; GOMES, P. R. S.; SANTOS, M. S.; BRAGE, J. A. P.; OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M.; UMISEDÓ, N. K. Radioactivity teaching: Environmental consequences of the radiological accident in Goiânia (Brazil). *American Journal of Physics*, v. 69, n. 3, p. 377-381, Mar. 2001.

ARAÚJO, W. S. D.; RODRIGUES, C. G. Comparação entre as ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 3, p. 360-365, set. 2001.

ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 3, n. 2, p. 211-227, mayo/ago. 2004. Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen3/REEC_3_2_7.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2013.

ASIKAINEN, M. A.; HIRVONEN, P. E. A study of pre- and inservice physics teachers' understanding of photoelectric phenomenon as part of the development of a research-based Quantum Physics course. *American Journal of Physics*, v. 77, n. 7, p. 658-666, July 2009.

_____. Probing Pre- and In-service Physics teachers' knowledge using the double-slit thought experiment. *Science & Education*, v. 23, n. 9, p. 1811-1833, Sept. 2014.

ASPECT, A. One century of quantum revolutions. In: SCARANI, V. (Ed.). *Quantum physics, a first encounter: interference, entanglement, and reality*. Oxford: Oxford University Press, 2006. p. ix-xiv.

ASPECT, A.; DALIBARD, J.; ROGER, G. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters*, v. 49, n. 2, p. 91-94, July 1982a.

_____. Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, v. 49, n. 25, p. 1804-1807, Dec. 1982b.

ASPECT, A.; GRANGIER, P.; ROGER, G. Experimental test of realistic local theories via Bell's Theorem. *Physical Review Letters*, v. 47, n. 7, p. 460-463, Aug. 1981.

ASPECT, A.; GRYNBERG, G.; FABRE, C. *Introduction to Quantum Optics – From the semi-classical approach to quantized light*. New York: Cambridge University Press, 2010.

AULETTA, G.; FORTUNATO, M.; PARISI, G. *Quantum mechanics*. New York: Cambridge University Press, 2009.

BAKHTIN, M. M. *The dialogic imagination: four essays*. Tradução de Caryl Emerson e Michael Holquist. Austin: University of Texas Press, 1981. (Slavic Series, 1).

BAKHTIN, M. M. Os gêneros do discurso. In: BAKHTIN, M. M. (Ed.). *Estética da Criação Verbal*. Tradução de Maria Ermantina Galvão G. Pereira. São Paulo: Martins Fontes, 1997. p. 261-306.

_____. *Marxismo e Filosofia da Linguagem: problemas fundamentais do método sociológico na ciência da linguagem*. Tradução de Michel Lahud e Yara Frateschi Vieira. 13. ed. São Paulo: Hucitec, 2009.

BAKHURST, D. Vygotsky's Demons. In: DANIELS, H.; COLE, M.; WERTSCH, J. V. (Eds.). *The Cambridge companion to Vygotsky*. New York: Cambridge University Press, 2007. p. 50-76.

BALLENTINE, L. E. The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, v. 42, n. 4, p. 358-381, Oct. 1970.

BALSAS, Á.; VIDEIRA, A. L. L. Truth by fiat: the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. *Revista Brasileira de História da Ciência*, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p. 248-266, jul./dez. 2013.

BAO, L.; REDISH, E. F. Understanding probabilistic interpretations of physical systems: a prerequisite to learning Quantum Physics. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, p. 210-217, Mar. 2002.

BARROS, M. A.; BASTOS, H. F. B. N. Investigando o uso do Ciclo da Experiência Kellyana na compreensão do conceito de difração de elétrons. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 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.

_____. On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics. *Reviews of Modern Physics*, v. 38, n. 3, p. 447-452, July/Sept. 1966.

_____. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. (Collected papers on quantum philosophy).

_____. Against "measurement". *Physics World*, v. 3, n. 8, p. 33-40, Aug. 1990.

BELL, T.; URHAHNE, D.; SCHANZE, S.; PLOETZNER, R. Collaborative inquiry learning: models, tools, and challenges. *International Journal of Science Education*, v. 32, n. 3, p. 349-377, 2010.

BERTLMANN, R. A.; ZEILINGER, A. *Quantum [Un]speakables: from Bell to quantum information*. New York: Springer, 2002.

BETH, R. A. Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light. *Physical Review*, v. 50, n. 2, p. 115-125, July 1936.

BETZ, M.; LIMA, I.; MUSSATTO, G. Dualidade onda-partícula: um objeto de aprendizagem baseado no interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 3, p. 3501.1-3501.8, jul./set. 2009.

BOHM, D. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of "Hidden" Variables I. *Physical Review*, v. 85, n. 2, p. 166-179, Jan. 1952a.

_____. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of "Hidden" Variables II. *Physical Review*, v. 85, n. 2, p. 180-193, Jan. 1952b.

_____. *Quantum theory*. New York: Dover publications, 1989.

BOHM, D.; BUB, J. A proposed solution of the measurement problem in Quantum Mechanics by a Hidden Variable Theory. *Reviews of Modern Physics*, v. 38, n. 3, p. 453-469, July 1966.

BOHR, N. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Nature*, n. 121 (Supl.), p. 580-590, Apr. 1928.

_____. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Physical Review*, v. 48, n. 8, p. 696-702, Oct. 1935.

_____. Causality and Complementarity. *Philosophy of Science*, v. 4, n. 3, p. 289-298, July 1937.

_____. On the Notions of Causality and Complementarity. *Dialectica*, v. 2, n. 3-4, p. 312-319, Nov. 1948.

_____. *Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

BOZELLI, F. C.; NARDI, R. O uso de analogias no processo comunicativo de sala de aula. In: *Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, XI*; 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UTFPR, SBF, UFPR, 2008. p. 1-12. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/xi/sys/resumos/T0187-1.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2013.

BRAIT, B. Análise e teoria do discurso. In: BRAIT, B. (Ed.). *Bakhtin: outros conceitos-chave*. São Paulo: Contexto, 2010. cap. 1, p. 9-31.

BRASIL. Parecer CNE/CES nº 1.304/2001. Dispõe sobre as Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física. Brasília, 2001.

_____. Lei nº 11.892, de 29 de dezembro de 2008. Institui a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica, cria os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia, e dá outras providências. Brasília, 2008.

_____. *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia: um novo modelo em educação profissional e tecnológica – concepções e diretrizes*. Brasília: Ministério da Educação, 2010.

_____. *Texto integral da Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996, que estabelece as diretrizes e bases da educação nacional*. 11. ed. Brasília: Edições Câmara, 2015. (Legislação, 159).

BROM, J. M.; RIOUX, F. Polarized light and quantum mechanics: an optical analog of the Stern-Gerlach experiment. *The Chemical Educator*, v. 7, n. 4, p. 200-204, Aug. 2002.

BUB, J. Quantum Entanglement and Information. In: ZALTA, E. N. (Ed.). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2015. Disponível em: <<http://plato.stanford.edu/entries/qt-entangle/>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

CABRAL, G. E. M.; LIMA, A. F.; LULA JR., B. Interpretando o algoritmo de Deutsch no interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, p. 109-116, 2004.

CAMILLERI, K. Constructing the myth of the Copenhagen Interpretation. *Perspectives on Science*, v. 17, n. 1, p. 26-57, spring 2009.

CARR, L. D.; MCKAGAN, S. B. Graduate quantum mechanics reform. *American Journal of Physics*, v. 77, n. 4, p. 308-319, Apr. 2009.

CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna – origens clássicas e fundamentos quânticos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

CASTRILLÓN, J.; FREIRE JR., O.; RODRÍGUEZ, B. Mecânica Cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 1501.1-1505.12, jan./mar. 2014.

CATALOGLU, E.; ROBINETT, R. W. Testing the development of student conceptual and visualization understanding in Quantum Mechanics through the undergraduate career. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, p. 238-251, Mar. 2002.

CHAIKLIN, S. The Zone of Proximal Development in Vygotsky's Analysis of Learning and Instruction. In: KOZULIN, A.; GINDIS, B.; AGEYEV, V. S.; MILLER, S. M. (Eds.). *Vygotsky's Educational Theory in Cultural Context*. New York: Cambridge University Press, 2003. cap. 2, p. 39-64.

CHANG, K. E.; CHEN, Y. L.; LIN, H. Y.; SUNG, Y. T. Effects of learning support in simulation-based physics learning. *Computers & Education*, v. 51, n. 4, p. 1486-1498, Dec. 2008.

CHEONG, Y. W.; SONG, J. Different levels of the meaning of wave-particle duality and a suspensive perspective on the interpretation of Quantum Theory. *Science & Education*, v. 23, n. 5, p. 1011-1030, May 2014.

CHIARELLI, R. A. *Física moderna e contemporânea no ensino médio : é possível abordar conceitos de mecânica quântica?* (2006). 171 f. Dissertação (Mestrado Profissional em

Ensino de Física) – Departamento de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

Clavatta, M.; Ramos, M. N. A “era das diretrizes”: a disputa pelo projeto de educação dos mais pobres. *Revista Brasileira de Educação*, v. 17, n. 49, p. 11-37, jan./abr. 2012.

Clark, K.; Holquist, M. *Mikhail Bakhtin*. Tradução de Jacó Guinsburg. São Paulo: Perspectiva, 2008.

Cluser, J.; Horne, M.; Shimony, A.; Holt, R. Proposed experiment to test local Hidden-Variable Theories. *Physical Review Letters*, v. 23, n. 15, p. 880-884, Oct. 1969.

Cleve, R.; Ekert, A.; Henderson, L.; Macchiavello, C.; Mosca, M. On quantum algorithms. *Complexity*, v. 4, n. 1, p. 33-42, Sept./Oct. 1998.

Contreras, J. *A autonomia de professores*. São Paulo: Cortez, 2002.

Cook, A. Max Born. *Notes & Records of Royal Society*, London, v. 56, n. 2, p. 131-132, May 2002.

Cuppari, A.; Rinaudo, G.; Robutti, O.; Violino, P. Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. *Physics Education*, v. 32, n. 5, p. 302-308, Sept. 1997.

Curilef, S.; Zander, C.; Plastino, A. R. Two particles in a double well: illustrating the connection between entanglement and the speed of quantum evolution. *European Journal of Physics*, v. 27, n. 5, p. 1193-1203, July 2006.

De Jong, T.; Linn, M. C.; Zacharia, Z. Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, v. 340, n. 6130, p. 305-308, Apr. 2013.

De Jong, T.; Van Joolingen, W. R. Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, v. 68, n. 2, p. 179-201, summer 1998.

Dederick, E.; Beck, M. Exploring entanglement with the help of quantum state measurement. *American Journal of Physics*, v. 82, n. 10, p. 962-971, Oct. 2014.

DeGiorgio, V. Phase shift between the transmitted and the reflected optical fields of a semireflecting lossless mirror is $\pi/2$. *American Journal of Physics*, v. 48, n. 1, p. 81-82, Jan. 1980.

Dehlinger, D.; Mitchell, M. W. Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 9, p. 898-902, Sept. 2002a.

_____. Entangled photons, nonlocality, and Bell inequalities in the undergraduate laboratory. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 9, p. 903-910, Sept. 2002b.

Del Río, P.; Álvarez, A. Inside and Outside the Zone of Proximal Development: an ecofunctional reading of Vygotsky. In: Daniels, H.; Cole, M.; Wertsch, J. V. (Eds.). *The Cambridge companion to Vygotsky*. New York: Cambridge University Press, 2007. cap. 11, p. 276-303.

DI FANTI, M. G. C. A linguagem em Bakhtin: pontos e pespontos. *Veredas – Revista de Estudos Linguísticos*, v. 7, n. 1-2, p. 95-111, jan./dez. 2003.

DILLENBOURG, P. Integrating technologies into educational ecosystems. *Distance Education*, v. 29, n. 2, p. 127-140, Aug. 2008.

DIMITROVA, T. L.; WEIS, A. The wave-particle duality of light: a demonstration experiment. *American Journal of Physics*, v. 76, n. 2, p. 137-142, Feb. 2008.

_____. Single photon quantum erasing: a demonstration experiment. *European Journal of Physics*, v. 31, n. 3, p. 625-637, May 2010.

DIRAC, P. A. M. *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford: Clarendon Press, 1958. 4 ed. revisada.

DOMINGUINI, L.; MAXIMIANO, J. R.; CARDOSO, L. Novas abordagens do conteúdo Física Moderna no Ensino Médio público do Brasil. In: *Seminário de Pesquisa em Educação da Região Sul, IX.*; 2012, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2012. Disponível em: <<http://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/anpedsul/9anpedsul/paper/viewFile/653/534>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

DÜRR, S.; NONN, T.; REMPE, G. Origin of quantum-mechanical complementarity probed by a 'which-way' experiment in an atom interferometer. *Nature*, v. 395, n. 6697, p. 33-37, Sept. 1998.

DYSON, F. John Archibald Wheeler: biographical memoirs. *Proceedings of the American Philosophical Society*, v. 154, n. 1, p. 125-129, Mar. 2010.

EDAMATSU, K. Entangled photons: generation, observation, and characterization. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 46, n. 11, p. 7175-7187, Nov. 2007.

EINSTEIN, A. Reply to criticism. In: SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein Philosopher-Scientist*. New York: MJF Books, 1970. p. 663-688. (Library of Living Philosophers). v. VII.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, v. 47, n. 10, p. 777-780, May 1935.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira e Marta Feijó Barroso. 13. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

ENGLERT, B.-G. Fringe visibility and which-way information: an inequality. *Physical Review Letters*, v. 77, n. 11, p. 2154-2157, Sept. 1996.

ENGLERT, B.-G.; SCULLY, M. O.; WALTHER, H. The duality in matter and light. *Scientific American*, v. 271, n. 6, p. 56-61, Dec. 1994.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; ARLEGO, M. Teaching the foundations of Quantum Mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 14, n. 1, p. 37-64, mar. 2009.

FARÍAS, O. J.; LATUNE, C. L.; WALBORN, S. P.; DAVIDOVICH, L.; RIBEIRO, P. H. S. Determining the dynamics of entanglement. *Science*, v. 324, n. 5933, p. 1414-1417, June 2009.

FERRARI, C.; BRAUNECKER, B. Entanglement, which-way measurements, and a quantum erasure. *American Journal of Physics*, v. 78, n. 8, p. 792-795, Aug. 2010.

FEYNMAN, R. P.; HIBBS, A. R. *Quantum Mechanics and Path Integrals*. New York: McGraw-Hill, 1965.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman lectures on Physics: quantum mechanics*. New York: Addison-Wesley, 1963. v. 3.

FINE, A. *The Shaky game: Einstein realism and the Quantum Theory*. Chicago: The University of Chicago Press, 1986. (Science and its conceptual foundations).

FINKELSTEIN, N. D.; ADAMS, W. K.; KELLER, C. J.; KOHL, P. B.; PERKINS, K. K.; PODOLEFSKY, N. S.; REID, S.; LEMASTER, R. When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, v. 1, n. 1, p. 010103.1-010103.8, Oct. 2005.

FREIRE JR., O. The historical roots of “Foundations of Quantum Physics” as a field of research (1950–1970). *Foundations of Physics*, v. 34, n. 11, p. 1741-1760, Nov. 2004.

_____. Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982). *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, v. 37, n. 4, p. 577-616, Dec. 2006.

_____. Filosofia da ciência e controvérsia científica: um leque de concepções físicas e interpretações filosóficas da Física Quântica. *Scientiae Studia*, v. 11, n. 4, p. 959-962, out./dez. 2013a.

_____. Orthodoxies on the Interpretation of Quantum Theory: the case of the Consistent History Approach. In: KATZIR, S.; LEHNER, C.; RENN, J. (Eds.). *Traditions and transformations in the history of Quantum Physics*. Berlin: Edition Open Access, 2013b. cap. 12, p. 293-307.

_____. Challenging the Monocracy of the Copenhagen School. In: FREIRE JR., O. (Ed.). *The Quantum dissidentes: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*. New York: Springer, 2015. cap. 2, p. 17-74.

FREIRE JR., O.; CARVALHO NETO, R. A.; ROCHA, J. F. M.; VASCONCELOS, M. J. L.; SOCORRO, M. S.; ANJOS, E. L. Introducing Quantum Physics in Secondary School. In: Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference, Minneapolis. University of Minnesota, 1995. p. 412-419.

FREITAS, F.; FREIRE JR., O. A formulação dos 'estados relativos' da teoria quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 2, p. 2307.1-2307.15, 2008a.

_____. Para que serve uma função de onda?: Everett, Wheeler, Bohr e uma nova interpretação da teoria quântica. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 1, n. 1, p. 12-25, jan./jun. 2008b.

FRIGOTTO, G.; SANDER, B.; PACHECO, E. Ensino Médio e a Educação Profissional: a ruptura com o dualismo estrutural. *Retratos da Escola*, v. 5, n. 8, p. 11-24, jan./jun. 2011. Disponível em: <<http://www.esforce.org.br/index.php/semestral/article/view/44>>. Acesso em: 19 maio 2013.

FUWA, M.; TOBA, S.; TAKEDA, S.; MAREK, P.; JR., L. M.; FILIP, R.; LOOCK, P. V.; YOSHIKAWA, J.-I.; FURUSAWA, A. Noiseless conditional teleportation of a single photon. *Physical Review Letters*, v. 113, n. 22, p. 223602.1-223602.5, Nov. 2014.

GALVEZ, E. J. Qubit Quantum Mechanics with correlated-photon experiments. *American Journal of Physics*, v. 78, n. 5, p. 510-519, May 2010.

GALVEZ, E. J.; HOLBROW, C. H.; PYSHER, M. J.; MARTIN, J. W.; COURTEMANCHE, N.; HEILIG, L.; SPENCER, J. Interference with correlated photons: five Quantum Mechanics experiments for undergraduates. *American Journal of Physics*, v. 73, n. 2, p. 127-140, Feb. 2005.

GAZIT, E.; YAIR, Y.; CHEN, D. Emerging conceptual understanding of complex astronomical phenomena by using a virtual solar system. *Journal of Science Education and Technology*, v. 14, n. 5, p. 459-470, Dec. 2005.

GIANCOLI, D. C. *Physics: Principles with Applications*. 6. ed. New Jersey: Pearson Education, 2005.

GIL, D.; PÉREZ, S. F.; SOLBES, J. La introducción a la Física Moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, v. Extra Part.: 3 - II Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, p. 209-210, 1987.

_____. Análisis crítico de la introducción de la Física Moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 2, n. 1, p. 16-21, 1988.

GILMORE, R. *Alice no país do quantum: a Física Quântica ao alcance de todos*. Tradução de André Penido. Rio de Janeiro: Zahar, 1998.

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

GORDON, M.; GORDON, G. Quantum computer games: quantum minesweeper. *Physics Education*, v. 45, n. 4, p. 372-377, July 2010.

GORIY, F.; SANTARSIEROY, M.; BORGHIZ, R.; GUATTARIZ, G. Orbital angular momentum of light: a simple view. *European Journal of Physics*, v. 19, n. 5, p. 439-444, Sept. 1998.

GRANGIER, P.; ROGER, G.; ASPECT, A. Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences. *Europhysics Letters*, v. 1, n. 4, p. 173-179, Feb. 1986.

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

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Construyendo significados en Mecánica Cuántica: fundamentación y resultados de uma propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitário. *Enseñanza de las Ciências*, v. 20, n. 2, p. 327-338, 2002.

_____. Superposição linear em ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 5, n. 1, p. 61-77, 2005.

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

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

GREENBERGER, D. M.; YASIN, A. Simultaneous wave and particle knowledge in a neutron interferometer. *Physics Letters A*, v. 128, n. 8, p. 391-394, Apr. 1988.

GREENSTEIN, G.; ZAJONC, A. *The quantum challenge: modern research on the foundations of quantum mechanics*. Sudbury: Jones and Bartlett, 2006.

GREGORIO, A. D. Bohr's way to defining complementarity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 45, p. 72-82, Feb. 2014.

GRIFFITHS, R. B. EPR, Bell, and quantum locality. *American Journal of Physics*, v. 79, n. 9, p. 954-965, Sept. 2011.

HADZIDAKI, P. 'Quantum Mechanics' and 'scientific explanation' an explanatory strategy aiming at providing 'understanding'. *Science & Education*, v. 17, n. 1, p. 49-73, Jan. 2008.

HADZIDAKI, P.; KALKANIS, G.; STAVROU, D. Quantum Mechanics: a systemic component of the Modern Physics paradigm. *Physics Education*, v. 35, n. 6, p. 386-392, Nov. 2000.

HAMILTON, M. W. Phase shifts in multilayer dielectric beam splitters. *American Journal of Physics*, v. 68, n. 2, p. 186-191, Feb. 2000.

HAROCHE, S.; RAIMOND, J.-M. *Exploring the Quantum – atoms, cavities and photons*. Oxford: Oxford University Press, 2006.

HEISENBERG, W. *Diálogos sobre Física Atômica*. Tradução de José Cardoso Ferreira. São Paulo: Editorial Verbo, 1971. (Documentos para o nosso tempo).

_____. *A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

HOLBROW, C. H.; GALVEZ, E.; PARKS, M. E. Photon Quantum Mechanics and beam splitters. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, p. 260-265, Mar. 2002.

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

JACQUES, V.; WU, E.; GROSSHANS, F.; TREUSSART, F.; GRANGIER, P.; ASPECT, A.; ROCH, J.-F. Experimental realization of Wheeler's Delayed-Choice Gedanken Experiment. *Science*, v. 315, n. 5814, p. 966-968, Feb. 2007.

_____. Delayed-Choice test of Quantum Complementarity with interfering single photons. *Physical Review Letters*, v. 100, n. 22, p. 220402.1-220402.4, June 2008.

JAEGER, G.; SHIMONY, A.; VAIDMAN, L. Two interferometric complementarities. *Physical Review A*, v. 51, n. 1, p. 54-67, Jan. 1995.

JAMMER, M. *The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in historical perspective*. New York: John Wiley and Sons, 1974.

JENNEWEIN, T.; SIMON, C.; WEIHS, G.; WEINFURTER, H.; ZEILINGER, A. Quantum cryptography with entangled photons. *Physical Review Letters*, v. 84, n. 20, p. 4729-4732, May 2000.

JOHNSON, B.; CHRISTENSEN, L. *Educational research: quantitative, qualitative and mixed approaches*. 3. ed. Thousand Oaks/Califórnia: SAGE Publications, 2008.

JOOS, E.; ZEH, H. D. The emergence of classical properties through interaction with the environment. *Physica B: Condensed Matter*, v. 59, n. 2, p. 223-243, June 1985.

KALKANIS, G.; HADZIDAKI, P.; STAVROU, D. An instructional model for a radical conceptual change towards Quantum Mechanics concepts. *Science Education*, v. 87, n. 2, p. 257-280, Mar. 2003.

KARAKOSTAS, V.; HADZIDAKI, P. Realism vs. Constructivism in Contemporary Physics: the impact of the debate on the understanding of Quantum Theory and its instructional process. *Science & Education*, v. 14, n. 7-8, p. 607-629, Nov. 2005.

KAWAMURA, M. R. D.; HOSOUME, Y. A contribuição da Física para um novo Ensino Médio. *A Física na Escola*, v. 4, n. 2, p. 22-27, out. 2003.

KLASSEN, S. The Photoelectric Effect: reconstructing the story for the physics classroom. *Science & Education*, v. 20, n. 7-8, p. 719-731, July 2011.

KLASSEN, S.; NIAZ, M.; METZ, D.; MCMILLAN, B.; DIETRICH, S. Portrayal of the History of the Photoelectric Effect in laboratory instructions. *Science & Education*, v. 21, n. 5, p. 729-743, May 2012.

KOHNLE, A.; BOZHINOVA, I.; BROWNE, D.; EVERITT, M.; FOMINS, A.; KOK, P.; KULAITIS, G.; PROKOPAS, M.; RAINE, D.; SWINBANK, E. A new introductory Quantum

Mechanics curriculum. *European Journal of Physics*, v. 35, n. 1, p. 015001.1-015001.9, Jan. 2014.

KOHNLE, A.; CASSETTARI, D.; EDWARDS, T. J.; FERGUSON, C.; GILLIES, A. D.; HOOLEY, C. A.; KOROLKOVA, N.; LLAMA, J.; SINCLAIR, B. D. A new multimedia resource for teaching quantum mechanics concepts. *American Journal of Physics*, v. 80, n. 2, p. 148-153, Feb. 2012.

KOHNLE, A.; DOUGLASS, M.; EDWARDS, T. J.; GILLIES, A. D.; HOOLEY, C. A.; SINCLAIR, B. D. Developing and evaluating animations for teaching Quantum Mechanics concepts. *European Journal of Physics*, v. 31, n. 6, p. 1441-1455, Nov. 2010.

KWIAT, P. G.; MATTLE, K.; WEINFURTER, H.; ZEILINGER, A.; SERGIENKO, A. V.; SHIH, Y. New High-Intensity source of polarization-entangled photon pairs. *Physical Review Letters*, v. 75, n. 24, p. 4337-4341, Dec. 1995.

KWIAT, P. G.; WAKS, E.; WHITE, A. G.; APPELBAUM, I.; EBERHARD, P. H. Ultrabright source of polarization-entangled photons. *Physical Review A*, v. 60, n. 2, p. R773-R776, Aug. 1999. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.60.R773>>.

LEACH, J.; PADGETT, M. J.; BARNETT, S. M.; FRANKE-ARNOLD, S.; COURTIAL, J. Measuring the Orbital Angular Momentum of a Single Photon. *Physical Review Letters*, v. 88, n. 25, p. 257901.1-257901.4, June 2002.

LEITE, A.; SIMON, S. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica. *Scientiæ Studia*, v. 8, n. 2, p. 213-241, abr./jun. 2010.

LEMONS, G. B.; BORISH, V.; COLE, G. D.; RAMELOW, S.; LAPKIEWICZ, R.; ZEILINGER, A. Quantum imaging with undetected photons. *Nature*, v. 512, n. 7515, p. 409-412, Aug. 2014.

LIMA JR., P.; OSTERMANN, F.; REZENDE, F. Marxism in Vygotskian approaches to cultural studies of science education. *Cultural Studies of Science Education*, v. 9, n. 3, p. 543-566, Sept. 2014.

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

LUIS, A.; GONZALO, I. Single-particle interference only when imperfect path detectors click simultaneously. *European Journal of Physics*, v. 36, n. 2, p. 025012.1-025012.11, Feb. 2015. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0143-0807/36/i=2/a=025012>>.

LUIS, A.; SANCHEZ-SOTO, L. L. A quantum description of the beam splitter. *Quantum and Semiclassical Optics: Journal of the European Optical Society Part B*, v. 7, n. 2, p. 153-160, Apr. 1995.

LURIA, A. R. Diferenças culturais de pensamento. In: VYGOTSKY, L. S.; LURIA, A. R.; LEONTIEV, A. N. (Eds.). *Linguagem, desenvolvimento e aprendizagem*. São Paulo: Ícone, 1988. cap. 3, p. 39-84.

MALGIERI, M.; ONORATO, P.; DE AMBROSIS, A. Teaching Quantum Physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations. *European Journal of Physics*, v. 35, n. 5, p. 055024.1-055024.21, Sept. 2014.

MARSHALL, M. N. Sampling for qualitative research. *Family practice*, v. 13, n. 6, p. 522-525, 1996.

MARTINS, R. A.; ROSA, P. S. *História da teoria quântica: a dualidade onda-partícula de Einstein a De Broglie*. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

MASON, A.; SINGH, C. Do advanced physics students learn from their mistakes without explicit intervention? *American Journal of Physics*, v. 78, n. 7, p. 760-767, July 2010.

MATTEUCCI, G.; FERRARI, L.; MIGLIORI, A. The Heisenberg uncertainty principle demonstrated with an electron diffraction experiment. *European Journal of Physics*, v. 31, n. 5, p. 1287-1293, Sept. 2010.

MAXIMIANO, J. R.; CARDOSO, L.; DOMINGUINI, L. Estruturação do conteúdo de Física Moderna nos livros didáticos do PNL 2012. *Revista Técnico-Científica do IF-SC*, edição especial, p. 45-47, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/view/295/218>>. Acesso em: 22 dez. 2012.

MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; DUBSON, M.; MALLEY, C.; REID, S.; LEMASTER, R.; WIEMAN, C. E. Developing and researching PhET simulations for teaching Quantum Mechanics. *American Journal of Physics*, v. 76, n. 4, p. 406-417, Apr. 2008.

MERMIN, N. D. *Quantum computation – lecture notes and homework assignments*. Cornell: Spring, 2006. Disponível em: <<http://people.ccmr.cornell.edu/~mermin/qcomp/CS483.html>>. Acesso em: 23 dez. 2012.

MICHELINI, M.; RAGAZZON, R.; SANTI, L.; STEFANEL, A. Proposal for Quantum Physics in secondary school. *Physics Education*, v. 35, n. 6, p. 406-410, Nov. 2000.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. *Ciência & Educação*, v. 15, n. 3, p. 557-580, 2009.

_____. Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio e a formação de professores: desencontros com a ação comunicativa e a ação dialógica emancipatória. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, v. 8, n. 1, p. 1-13, jun. 2013.

MONTENEGRO, R. L.; PESSOA JR, O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 7, n. 2, p. 107-126, maio 2002.

MOREIRA, M. A. Unidades de Enseñanza Potencialmente Significativas - UEPS. *Aprendizagem Significativa em Revista*, v. 1, n. 2, p. 43-63, ago. 2011.

MOREIRA, M. A.; HILGER, T. R.; PRÄSS, A. R. Representaciones sociales de la Física y de la Mecánica Cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 22, n. 1, p. 15-30, 2009.

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, S.; NIELSEN, W.; PETRINA, S. Whatever happened to STS? Pre-service physics teachers and the history of quantum mechanics. *Science & Education*, v. 17, n. 4, p. 387-401, Apr. 2008.

NETO, J. S.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Apropriação do conceito de emaranhamento quântico por professores em formação. In: *Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, XV*; 2014, São Sebastião/SP. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2014. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xv/sys/resumos/T0144-1.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2015.

NETO, J. S.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. Wave-particle complementarity: teaching quantum physics with a Virtual Mach-Zehnder Interferometer. In: *GIREP-MPTL International Conference on Teaching/Learning Physics: Integrating Research into Practice*; 2014, Palermo. **Proceedings...** Palermo: Università degli Studi di Palermo, 2015. p. 871-878.

NETO, J. S.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Formação de técnicos na área de Radiologia Médica: desenvolvimento de uma página na internet como recurso didático. *A Física na Escola*, v. 11, n. 1, p. 32-35, abr. 2010.

_____. O tema da dualidade onda-partícula na educação profissional em radiologia médica a partir da simulação do interferômetro de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 1, p. 1401.1-1401.10, jan./mar. 2011.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. v. 4.

OLYMPIOU, G.; ZACHARIA, Z. Blending physical and virtual manipulatives: an effort to improve students' conceptual understanding through science laboratory experimentation. *Science Education*, v. 96, n. 1, p. 21-47, Jan. 2012.

OMNÈS, R. Consistent interpretations of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics*, v. 64, n. 2, p. 339-382, Apr. 1992.

_____. *The interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press, 1994. (Princeton series in Physics).

_____. *Understanding Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press, 1999.

ONU. Atlas Brasil 2013: Tabelas complementares para avaliação dos municípios brasileiros. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2013. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/Noticia.aspx?id=3750>>. Acesso em: 10 jun. 2013.

OSNAGHI, S. A dissolução Pragmático-Transcendental do problema da medição em Física Quântica. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 15, n. 1, p. 79-125, jan./jun. 2005.

OSNAGHI, S.; FREITAS, F.; FREIRE JR., O. The origin of the Everettian heresy. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 40, n. 2, p. 97-123, May 2009.

OSTERMANN, F. Um texto para professores do ensino médio sobre partículas elementares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 21, n. 3, p. 415-436, set. 1999.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 16, n. 3, p. 267-286, dez. 1999.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, n. 3, p. 1094-1116, 2009. Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf>. Acesso em: 13 Mar. 2013.

OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M.; CAVALCANTI, C. J. H. Tópicos de Física Contemporânea no Ensino Médio: um texto para professores sobre supercondutividade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 20, n. 3, p. 270-288, set. 1998.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Física Contemporânea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 18, n. 3, p. 391-404, 2000.

_____. Updating the physics curriculum in high schools: a teaching unit about superconductivity. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 3, n. 2, p. 1-13, 2004.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 2, p. 193-203, abr./jun. 2005.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Desenvolvimento de um software para o ensino de fundamentos de Física Quântica. *A Física na Escola*, v. 7, n. 1, p. 22-25, maio 2006.

_____. 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.; RICCI, T. S. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. *Ciência & Educação*, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

_____. Conceitos de Física Quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 1, p. 9-35, abr. 2005.

ÖZCAN, Ö. How do the students describe the Quantum Mechanics and Classical Mechanics? *Latin-American Journal of Physics Education*, v. 4, n. 1, p. 22-26, Jan. 2010.

PAN, J.-W.; BOUWMEESTER, D.; DANIELL, M.; WEINFURTER, H.; ZEILINGER, A. Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement. *Nature*, v. 403, n. 6769, p. 515-519, Feb. 2000.

PAN, J.-W.; BOUWMEESTER, D.; WEINFURTER, H.; ZEILINGER, A. Experimental entanglement swapping: entangling photons that never interacted. *Physical Review Letters*, v. 80, n. 18, p. 3891-3894, May 1998.

PANTOJA, G. C. F.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia*, v. 4, n. 3, p. 1-34, set./dez. 2011.

PANTOJA, G. C. F.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. La enseñanza de conceptos fundamentales de Mecánica Cuántica a alumnos de graduación en Física. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, v. 9, n. 1, p. 22-39, jul. 2014.

PATY, M. “Construção do objeto” e objetividade na Física Quântica. In: FREIRE JR., O.; PESSOA JR, O.; BROMBERG, J. L. (Eds.). *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*. Campina Grande: Eduepb/Livraria da Física, 2010. p. 153-180.

PEARSON, B. J.; JACKSON, D. P. A hands-on introduction to single photons and Quantum Mechanics for undergraduates. *American Journal of Physics*, v. 78, n. 5, p. 471-484, May 2010.

PEDUZZI, L. O. Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 4, p. 545-557, out./dez. 2005.

PEREIRA, A. P. *Fundamentos da Física Quântica na formação de professores: uma análise de interações discursivas em atividades centradas no uso de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. (2008). 139 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009. Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART5_Vol8_N1.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2013.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 14, n. 3, p. 393-420, dez. 2009.

_____. A aproximação sociocultural à mente, de James V. Wertsch e implicações para a educação em ciências. *Ciência & Educação*, v. 18, n. 1, p. 23-39, 2012a.

_____. Recursos e restrições nas explicações de futuros professores de Física sobre Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 12, n. 2, p. 9-28, 2012b.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. O ensino de Física Quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores

mediado por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 8, n. 2, p. 376-398, 2009a.

_____. On the use of a virtual Mach–Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, v. 44, n. 3, p. 281-291, May 2009b.

_____. Um estudo sobre a fala privada em uma tarefa mediada por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. In: *Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, VII*; 2009, Florianópolis. **Atas...** Florianópolis: ABRAPEC, 2009c. Disponível em: <<http://posgrad.fae.ufmg.br/posgrad/viipec/pdfs/584.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2011.

_____. A ocorrência da ‘fala privada’ entre adultos: uma estratégia analítica para o estudo das funções intrapsicológicas no ensino de ciências. *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 13, n. 1, p. 105-120, jan./abr. 2011.

_____. Um exemplo de “distribuição social da mente” em uma aula de Física Quântica. *Ciência & Educação*, v. 18, n. 2, p. 257-270, 2012.

PEREIRA, A. P.; PESSOA JUNIOR, O.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da Física Quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 29, n. especial 2, p. 831-863, out. 2012.

PÉREZ, H.; SOLBES, J. Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la Física. *Enseñanza de las Ciencias*, v. 24, n. 2, p. 269-283, 2006.

PESSOA JR., O. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 19, n. 1, p. 27-48, mar. 1997.

_____. *Conceitos de Física Quântica*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005. v. 1.

_____. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2006. v. 2.

_____. As interpretações contemporâneas da mecânica quântica. 2008a. p. 1-8. Disponível em: <http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/cs00508.2008_08_21_10_39_21.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2015.

_____. As interpretações da Mecânica Quântica. *Ciência Hoje*, v. 42, n. 250, p. 32-38, jul. 2008b.

_____. *História da teoria quântica*. 2010. p.1-24. Disponível em: <<http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/Hist-MQ-2.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

_____. Interpretações básicas da teoria quântica: Einstein estava errado, no argumento de EPR?. 2012. p. 1-8. Disponível em: <<http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/FMQ-Nao-Localidade-1.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.

PINTO, M. J. *Comunicação e discurso: introdução à análise de discursos*. São Paulo: Hacker, 1999.

PINTO NETO, N. Histórias consistentes e outras abordagens. In: MARINHO, J. R. (Ed.). *Teorias e interpretações da Mecânica Quântica*. Rio de Janeiro: Livraria da Física, 2010. cap. 8, p. 97-111.

POLLACK, G. L.; STUMP, D. R. *Electromagnetism*. Beijing: Higher Education Press, 2005.

POSPIECH, G. Teaching the EPR paradox at high school? *Physics Education*, v. 34, n. 5, p. 311-316, Sept. 1999.

_____. Uncertainty and complementarity: the heart of quantum physics. *Physics Education*, v. 35, n. 6, p. 393-399, Nov. 2000.

_____. Philosophy and Quantum Mechanics in science teaching. *Science & Education*, v. 12, n. 5-6, p. 559-571, Aug. 2003.

RAMALHO, B. L.; NÚÑEZ, I. B.; GAUTHIER, C. *Formar o professor, profissionalizar o ensino: perspectivas e desafios*. 2. ed. Porto Alegre: Sulina, 2004.

REDHEAD, M. *Incompleteness, Nonlocality, and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*. Oxford: Clarendon Press, 1987.

REZENDE, F.; OSTERMANN, F. A prática do professor e a pesquisa em Ensino de Física: novos elementos para repensar essa relação. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 3, p. 316-337, dez. 2005.

REZENDE JR., M. F.; SOUZA CRUZ, F. F. Física Moderna e Contemporânea na formação de licenciandos em Física: necessidades, conflitos e perspectivas. *Ciência & Educação*, v. 15, n. 2, p. 305-321, 2009.

RICARDO, E. C.; CUSTÓDIO, J. F.; REZENDE JR., M. F. A tecnologia como referência dos saberes escolares: perspectivas teóricas e concepções dos professores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 135-147, 2007.

RICARDO, E. C.; ZYLBERSZTAJN, A. O ensino das ciências no nível médio: um estudo sobre as dificuldades na implementação dos Parâmetros Curriculares Nacionais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, p. 351-370, dez. 2002.

RICCI, T. S. F.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 79-88, 2007.

RINGBAUER, M.; DUFFUS, B.; BRANCIARD, C.; CAVALCANTI, E. G.; WHITE, A. G.; FEDRIZZI, A. Measurements on the reality of the wavefunction. *Nature Physics*, v. 11, n. 3, p. 249-254, Mar. 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/pdf/1412.6213v2.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2015.

RODRIGUES, M. F. *Da racionalidade técnica à “nova” epistemologia da prática: a proposta de formação de professores e pedagogos nas políticas oficiais atuais*. (2005).

228 f. Tese (Doutorado em Educação) – Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ROMANELLI, N. A questão metodológica na produção vygotskyana e a dialética marxista. *Psicologia em Estudo*, v. 16, n. 2, p. 199-208, abr./jun. 2011.

ROMMETVEIT, R. Psychological inquiries into semantic and pragmatic aspects of utterances. In: ROMMETVEIT, R. (Ed.). *Words, meanings and messages: theory and experiments in psycholinguistics*. New York: Academic Press, 1968. cap. 4, p. 257-300.

RONDE, C. Colonialidad del saber/poder en la educación y el conocimiento científico-tecnológico en América Latina: El caso de la Mecánica Cuántica en la investigación y la formación universitaria. *Revista de Enseñanza de la Física*, v. 26, n. extra, p. 355-363, 2014.

ROSA, M. I. F. P. S.; SCHNETZLER, R. P. A investigação-ação na formação continuada de professores de Ciências. *Ciência & Educação*, v. 9, n. 1, p. 27-39, 2003.

RUTTEN, N.; VAN JOOLINGEN, W. R.; VAN DER VEEN, J. T. The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, v. 58, n. 1, p. 136-153, Jan. 2012.

SCHNEIDER, M. B.; LA PUMA, I. A. A simple experiment for discussion of quantum interference and which-way measurement. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, p. 266-271, Mar. 2002.

SCULLY, M. O.; DRÜHL, K. Quantum eraser: a proposed photon correlation experiment concerning observation and “delayed choice” in Quantum Mechanics. *Physical Review A*, v. 25, n. 4, p. 2208-2213, Apr. 1982.

SCULLY, M. O.; ENGLERT, B.-G.; WALTHER, H. Quantum optical tests of complementarity. *Nature*, v. 351, n. 6322, p. 111-116, May 1991.

SCULLY, M. O.; WALTHER, H. Quantum optical test of observation and complementarity in Quantum Mechanics. *Physical Review A*, v. 39, n. 10, p. 5229-5236, May 1989.

SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. Física Quântica no Ensino Médio: o que dizem as pesquisas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, p. 624-652, dez. 2011.

SILVA, L. L.; ALMEIDA, M. J. P. M. Linguagem analógica: prós e contras na literatura sobre ensino de Física no Brasil. In: *Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, XI*, 2008. Curitiba. **Atas...** Curitiba: UTFPR, SBF, UFPR, 2008. p. 1-12. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/xi/sys/resumos/T0014-1.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2013.

SINGH, C. Student understanding of Quantum Mechanics. *American Journal of Physics*, v. 69, n. 8, p. 885-895, Aug. 2001.

_____. Interactive learning tutorials on quantum mechanics. *American Journal of Physics*, v. 76, n. 4, p. 400-405, Apr. 2008a.

_____. Student understanding of Quantum Mechanics at the beginning of graduate instruction. *American Journal of Physics*, v. 76, n. 3, p. 277-287, Mar. 2008b.

SOLBES, J.; CALATAYUD, M. L.; CLIMENT, J. B.; NAVARRO, J. Diseño de un currículum para la introducción del modelo atómico cuántico. *Enseñanza de las Ciências*, v. 5, n. extra, p. 309-310, 1987.

SOUZA, P. F. L.; BASTOS, H. F. B. N.; COSTA, E. B.; NOGUEIRA, R. A. Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 2, p. 2402.1-2402.10, abr./jun. 2010.

STEFANI, C.; TSAPARLIS, G. Students' levels of explanations, models, and misconceptions in Basic Quantum Chemistry: a phenomenographic study. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 46, n. 5, p. 520-536, May 2009.

TADDEI, M. M.; ESCHER, B. M.; DAVIDOVICH, L.; FILHO, R. L. D. M. Quantum speed limit for physical processes. *Physical Review Letters*, v. 110, n. 5, p. 050402.1-050402.5, Jan. 2013.

TELICHEVESKY, L. *Uma perspectiva sociocultural para a introdução de conceitos de Física Quântica no Ensino Médio: análise das interações discursivas em uma unidade didática centrada no uso do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder*. (2015). 192 f. (Mestrado) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º Grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.

_____. *Perspectivas para a inserção da Física Moderna na escola média*. (1994). 241 f. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

THORN, J. J.; NEEL, M. S.; DONATO, V. W.; BERGREEN, G. S.; DAVIES, R. E.; BECK, M. Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory. *American Journal of Physics*, v. 72, n. 9, p. 1210-1219, Sept. 2004.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física Moderna*. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UTZ, K. O método dialético de Hegel. *Veritas*, v. 50, n. 1, p. 165-185, mar. 2005. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/veritas/article/viewFile/1797/1327>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

VAN DER WAERDEN, B. L. *Sources of Quantum Mechanics*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1967.

VOLOCHINOV, V. N. Discurso na vida e na arte: sobre a poética sociológica. In: VOLOCHINOV, V. N. (Ed.) In: I. R. Titunik. *Freudism*. New York: Academic Press, 1976

VYGOTSKY, L. S. *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*. 2. ed. London: Harvard University Press, 1978.

_____. Thinking and speech. In: RIEBER, R. W.; CARTON, A. S. (Eds.). *The collected works of L. S. Vygotsky - Problems of general psychology*. New York: Plenum Press, 1987. p. 39-285. v. 1.

_____. *A formação social da mente*. 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

_____. The Structure of Higher Mental Functions. In: RIEBER, R. W. (Ed.). *The collected works of L. S. Vygotsky: The history of the development of higher mental functions*. New York: Plenum Press, 1997. cap. 4, p. 83-96. v. 4.

_____. *Pensamento e Linguagem*. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

VYGOTSKY, L. S.; LURIA, A. R. *Estudos sobre a história do comportamento: Símios, homem primitivo e criança*. Tradução de Lólio Lourenço de Oliveira. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

WALBORN, S. P.; CUNHA, M. O. T.; PÁDUA, S. P.; MONKEN, C. H. Double-slit quantum eraser. *Physical Review A*, v. 65, n. 3, p. 033818.1-033818.6, Mar. 2002.

WALTHER, P.; RESCH, K. J.; RUDOLPH, T.; SCHENCK, E.; WEINFURTER, H.; VEDRAL, V.; ASPELMEYER, M.; ZEILINGER, A. Experimental one-way quantum computing. *Nature*, v. 434, n. 7030, p. 169-176, Mar. 2005.

WERTSCH, J. V. The Zone of Proximal Development: some conceptual issues. In: ROGOFF, B.; WERTSCH, J. V. (Eds.). *Children's learning in the "Zone of Proximal Development"*. San Francisco: Jossey-Bass, 1984. p. 7-18. (New Directions for Child Development). v. 23.

_____. *Vygotsky and the social formation of mind*. Cambridge: Harvard University Press, 1985.

_____. *Voces de la mente: un enfoque sociocultural para el estudio de la acción mediada*. Madrid: Visor Distribuciones, 1993.

_____. *Mind as Action*. New York: Oxford University Press, 1998.

_____. Mediation. In: DANIELS, H.; COLE, M.; WERTSCH, J. V. (Eds.). *The Cambridge companion to Vygotsky*. New York: Cambridge University Press, 2007. cap. 7, p. 178-192.

WHEELER, J. A. The "Past" and the "Delayed-Choice" Double-Slit Experiment. In: MARLOW, A. R. (Ed.). *Mathematical Foundations of Quantum Theory*. New York: Academic Press, 1978. p. 9-48.

WOOTTERS, W. K.; ZUREK, W. H. Complementarity in the double-slit experiment: quantum nonseparability and a quantitative statement of Bohr's principle. *Physical Review D*, v. 19, n. 2, p. 473-484, Jan. 1979.

WUTTIPROM, S.; SHARMA, M. D.; JOHNSTON, I. D.; CHITAREE, R.; SOANKWAN, C. Development and use of a conceptual survey in introductory Quantum Physics. *International Journal of Science Education*, v. 31, n. 5, p. 631-654, Mar. 2009.

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

ZEH, H. D. On the interpretation of measurement in quantum theory. *Foundations of Physics*, v. 1, n. 1, p. 69-76, Mar. 1970.

ZEILINGER, A. General properties of lossless beam splitters in interferometry. *American Journal of Physics*, v. 49, n. 9, p. 882-883, Sept. 1981.

ZHANG, P.; AUNGSKUNSIRI, K.; MARTÍN-LOPEZ, E.; WABNIG, J.; LOBINO, M.; NOCK, R. W.; MUNNS, J.; BONNEAU, D.; JIANG, P.; LI, H. W.; LAING, A.; RARITY, J. G.; NISKANEN, A. O.; THOMPSON, M. G.; O'BRIEN, J. L. Reference frame independent quantum key distribution server with telecom tether for on-chip client. *Physical Review Letters*, v. 112, n. 13, p. 130501.1-130501-5, Apr. 2014.

ZHU, G.; SINGH, C. Improving students' understanding of Quantum Mechanics via the Stern–Gerlach experiment. *American Journal of Physics*, v. 79, n. 5, p. 499-507, May 2011.

_____. Surveying students' understanding of Quantum Mechanics in one spatial dimension. *American Journal of Physics*, v. 80, n. 3, p. 252-259, Mar. 2012.

ZOLLMAN, D. A.; REBELLO, N. S.; HOGG, K. Quantum mechanics for everyone: Hands-on activities integrated with technology. *American Journal of Physics*, v. 70, n. 3, p. 252-259, Mar. 2002.

ZUREK, W. H. Pointer basis of quantum apparatus: Into what mixture does the wave packet collapse? *Physical Review D*, v. 24, n. 6, p. 1516-1525, Sept. 1981.

APÊNDICE A

TERMO DE CONSENTIMENTO

Eu, _____, RG _____, aluno(a) da disciplina de Física Moderna e Contemporânea I, 201_/2, ofertada no curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Bento Gonçalves (IFRS-BG), declaro por meio deste termo que participo, de forma voluntária, da coleta de dados da pesquisa científica “Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico na formação de professores de Física segundo a perspectiva sociocultural”.

A pesquisa será realizada pelo doutorando Jader da Silva Netto, professor da referida disciplina e aluno do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação dos professores Fernanda Ostermann e Cláudio José de Holanda Cavalcanti.

Declaro que fui informado em relação aos objetivos desta pesquisa, os quais são:

- Implementar bases teóricas e metodológicas para o ensino de tópicos de FQ, à luz do referencial sociocultural, na formação inicial de professores de Física, estabelecendo o diálogo entre o legado teórico e filosófico da FQ com aquilo que está na cultura moderna, no imaginário popular e na mídia;
- Dar continuidade ao desenvolvimento e à avaliação de recursos didáticos que possam mediar o ensino desses tópicos, pesquisando em que medida essa mediação conforma a ação educativa.

Declaro que fui igualmente informado de que os dados coletados a partir da pesquisa serão utilizados apenas em situações acadêmicas (artigos científicos, palestras, seminários, trabalhos de conclusão de curso, etc.) de forma a sempre manter o anonimato. Autorizo o uso destas informações bem como de fotos, filmagens e gravações de áudio obtidas durante minha participação na pesquisa.

Fui ainda informado de que posso deixar de participar da pesquisa a qualquer momento, mediante a comunicação, por escrito, ao pesquisador responsável pela mesma.

Bento Gonçalves, _____ de _____ de 201__.

Pesquisador

Participante

APÊNDICE B



DEPARTAMENTO DE ENSINO DE GRADUAÇÃO

PLANEJAMENTO DE ENSINO

2012/2

NOME DO PROFESSOR: Jader da Silva Neto	
CURSO: Extensão	
TURMA: 2012	
COMPONENTE CURRICULAR: Currículo escolar do Ensino Médio e a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea	
CARGA HORÁRIA: 100 h	CRÉDITOS: 6,5

EMENTA:

Componente curricular Física no Ensino Médio atual; pesquisas acerca da introdução da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio; introdução à Física Moderna; supercondutividade; dualidade onda-partícula; interpretação de Copenhagen.

OBJETIVOS:

Discutir o currículo de Física vigente no Ensino Médio e, embasado nos resultados das pesquisas em ensino na área, abordar temas de Física Moderna e Contemporânea visando a capacitação docente e a inserção desta temática nas salas de aula

CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS:

1. A Física no Ensino Médio hoje

Conteúdos abordados

A visão do professor

A visão do aluno

2. A pesquisa em ensino de Física

Linhas de pesquisa

Pesquisa em Ensino de Física Moderna e Contemporânea

3. Supercondutividade

Descoberta da supercondutividade

Materiais supercondutores

Teoria da supercondutividade

Sugestões de abordagem no Ensino Médio

Levitação magnética

Supercondutor *versus* condutor perfeito

Efeito Meissner

4. Física Quântica

Origens históricas

1ª revolução da Física Quântica

As ondas de matéria de *de Broglie*

Complementaridade onda-partícula

Notação de Dirac (revisão/introdução)

Representação de operadores no IVMZ

Interpretações da Física Quântica

PROCEDIMENTOS DIDÁTICOS:

Será adotada uma metodologia que vise o debate dos tanto dos conteúdos de Física abordados quanto das metodologias propostas para sua inserção no Ensino Médio. Dessa forma, as aulas consistem em um momento de troca de saberes, o que será possibilitado através de aulas expositivas, leitura e debate de artigos em periódicos e atividades no laboratório de informática, possibilitando um espaço para diálogos e questionamentos entre professor-aluno e aluno-aluno.

No decorrer do semestre serão utilizados os seguintes recursos:

- Quadro branco;
- Projetor multimídia;
- Laboratório de informática
- Livros;
- Textos em revistas de divulgação científica;

AVALIAÇÃO:

- A avaliação desta proposta de trabalho será baseada na análise de roteiros exploratórios, debates em sala de aula e entrevistas.
- A certificação dos alunos levará em consideração o percentual mínimo de 75 por cento de presença.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros:

Brennan, R. P. Gigantes da Física: uma história da Física Moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2003.

Caruso, F.; Oguri, V. Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

Ostermann, F. Tópicos de Física contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de Física. Tese (Doutorado em Física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

Ostermann, F.; Ricci, T. F. Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do Ensino Médio – Texto de apoio ao professor de Física – nº 14. Porto Alegre: Instituto de Física, 2003.

Ostermann, F.; Pureur, P. Supercondutividade – Coleção Temas Atuais de Física – 1 Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

Pessoa Junior, O. Conceitos de Física Quântica, vol. 1 – 1 Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

Pessoa Junior, O. Conceitos de Física Quântica, vol. 2 – 1 Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

Scarani, V. Quantum Physics: a first encounter – interference, entanglement and reality. Great Britain: Oxford University Press, 2006.

Periódicos:

A Física na escola <http://www.sbfisica.org.br/fne/>

Caderno Brasileiro de Ensino de Física
<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/issue/archive>

Revista Brasileira de Ensino de Física <http://www.sbfisica.org.br/rbef/edicoes.shtml>

CRONOGRAMA

Setembro

D	S	T	Q	Q	S	S
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Outubro

D	S	T	Q	Q	S	S
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Novembro

D	S	T	Q	Q	S	S
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	

Dezembro

D	S	T	Q	Q	S	S
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Assinatura do Professor

APÊNDICE C

Primeira etapa da coleta de dados

ROTEIRO EXPLORATÓRIO I

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Regime clássico

1- Na barra de ferramentas do lado direito, parte superior, selecione a opção *Way of Rays* e observe a trajetória dos raios de luz no interferômetro. Em seguida, selecione novamente esta opção para desativar este comando.

2- Identifique as estruturas que compõem o interferômetro deslocando o *mouse* sobre elas.

3- Localize os dispositivos *Beam Splitter* e *Mirror*.

3.1- O que ocorre com os raios de luz nestes dispositivos?

4- Na barra de ferramentas do lado direito, parte superior, na janela *Source*, selecione a opção *Laser* e ligue a fonte.

4.1- Observe o que aparece nos anteparos e descreva o que você observou.

5- *Beam Splitter* é um espelho semirrefletor, também chamado divisor de feixe. Estes dispositivos dividem a luz incidente em dois componentes, transmitindo 50 por cento da intensidade da luz incidente e refletindo outros 50 por cento (mas pode ser configurado para transmitir e refletir em proporções diferentes dessa). Cada reflexão em um espelho semirrefletor introduz um deslocamento de fase na luz que corresponde a uma diferença de caminho igual a $\lambda/4$ desta radiação. Para cada reflexão nos espelhos, essa mudança de fase corresponde a uma diferença de caminho de $\lambda/2$. Calcule o $\Delta\lambda$ entre os componentes em cada anteparo e explique o resultado encontrado.

6- Retire o espelho semirrefletor 2 do interferômetro, usando a opção *Beam Splitter 2* localizada na janela *Instruments*, no lado esquerdo da tela e observe os anteparos.

6.1- Qual o papel desempenhado pelo segundo espelho semirrefletor no interferômetro?

7- A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime monofotônico (como nos experimentos de Alain Aspect e seus colaboradores). No regime monofotônico, ou regime quântico, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez.

7.1- Na janela *Source*, selecione a opção *Single Photons*.

7.2- Na janela *Instruments*, observe a contagem nos anteparos.

7.3- O padrão de detecções nos anteparos revela interferência? Por quê?

8- Na janela *Instruments*, substitua os anteparos (*Screen 1* e *2*) pelos detectores 1 e 2.

8.1- O padrão de detecções revela interferência? Por quê?

9- Na janela *Instruments*, recoloque o espelho semirrefletor 2 (*Beam Splitter 2*). Observe os dois detectores e, no lado direito da tela, na janela *Photon Counters*, compare o número de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons detectados no detector 1 (N_1).

9.1- Como podemos explicar a distribuição dessas detecções? Lembre-se que a fonte está emitindo um fóton por vez, ou seja, a cada instante, apenas um fóton se encontra no interferômetro.

9.2- Este padrão de detecções revela interferência? Por quê?

9.3- É possível inferir por qual dos braços do interferômetro seguiu o fóton?

10- Insira um detector demolição no interferômetro (opção *Demolition Detectors*). Observe, na janela *Photon Counters*, o número de detecções nos detectores (N_1 e N_2) e no detector N_A , ou N_B .

10.1- O padrão de detecções revela interferência?

10.2- E então, é possível inferir por qual dos braços do interferômetro seguiu o fóton? Explique.

11- Insira o outro detector demolição no interferômetro e observe o número de detecções em cada um deles. Use a barra de rolagem na janela *Photon Counters* para visualizar os demais contadores.

11.1- E agora, é possível inferir por qual dos braços do interferômetro seguiu o fóton?

11.2- Neste caso, o padrão de detecções em N_A e N_B revela interferência?

12- Como se comporta o padrão de detecções nos detectores 1 e 2 a cada vez que tentamos inferir o caminho percorrido pelo fóton por meio da inserção de detectores demolição? Explique.

13- Na janela *Instruments*, selecione a opção *Non-Demolition Detectors* e insira um detector não-demolição em um dos braços do interferômetro. Um detector não-demolição, não absorve o fóton, apenas “marca” o seu caminho, fornecendo-nos informação sobre o caminho “escolhido” no interferômetro.

13.1- Quando “marcamos” os fótons, conseguimos obter as detecções de modo a revelar a interferência?

14- Retire o detector não-demolição inserido anteriormente. Outra forma de obter informação acerca do caminho “escolhido” pelo fóton consiste em variar os coeficientes de reflexão nos espelhos semirrefletores.

14.1- Descreva de que forma você exploraria estes coeficientes a fim de descobrir o caminho “escolhido” pelos fótons. Explique.

APÊNDICE D

Primeira etapa da coleta de dados

ROTEIRO EXPLORATÓRIO II

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Complementaridade onda-partícula

Leia atentamente as orientações contidas em cada questão, pois algumas delas sugerem a resolução sem que o interferômetro esteja ligado.

1- No menu *Instruments*, selecione $R_1 = T_1$ e $R_2 = 0,80$. Com o interferômetro **desligado**, calcule:

- a) a previsibilidade;
- b) a distinguibilidade;
- c) a probabilidade de acerto ao selecionar um fóton no anteparo 1 e tentar adivinhar o caminho escolhido por ele.
- d) **Ligue** o interferômetro e confira o valor indicado para a distinguibilidade. Como você explica fisicamente este resultado?

2- Com o interferômetro ainda **ligado**, altere os coeficientes para os seguintes valores: $R_1 = 0,20$ e $R_2 = 0,75$. Explique por que o padrão de interferência no anteparo 1 tem baixo contraste enquanto que, para o mesmo arranjo experimental, o anteparo 2 apresenta um padrão de interferência bastante claro.

3- Desligue o interferômetro. Selecione os coeficientes $R_1 = 0,15$ e $R_2 = 0,35$. Calcule as seguintes probabilidades:

- a) fóton escolher o caminho A e ser detectado no anteparo 1;
- b) fóton escolher o caminho B e ser detectado no anteparo 1;
- c) fóton escolher o caminho A e ser detectado no anteparo 2;
- d) fóton escolher o caminho B e ser detectado no anteparo 2;
- e) percentual de fótons no anteparo 1.

4- Ajuste $R_1 = 1,00$ e $R_2 = 0,90$. **Ligue** o interferômetro e, no caixa de seleção de R_2 diminua continuamente o valor deste coeficiente até $R_2 = 0,50$. Como você justifica o fato de as distinguibilidades se manterem inalteradas mesmo você variando o valor de R_2 ?

5- Mantenha o interferômetro **ligado**, bem como $R_1 = 1,00$ e $R_2 = 0,05$. Observe o padrão de interferência formado nos anteparos. Altere o valor de R_1 para $R_1 = 0,99$ e observe novamente os anteparos. Como você justifica, em termos de informação disponível sobre o caminho escolhido, a brusca variação na distinguibilidade no anteparo 2?

APÊNDICE E

Segunda e terceira etapas da coleta de dados

ROTEIRO EXPLORATÓRIO I

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Regime clássico

- 1- Localize o arquivo *Mach-Zehnder.exe* na área de trabalho.
- 2- Com o *software* aberto, aumente o nível de *zoom* através do botão central do *mouse* para facilitar a visualização das estruturas do interferômetro.
- 3- Identifique cada uma das partes que integram o interferômetro.
- 4- Na barra de ferramentas do lado direito, parte superior, selecione a opção *Way of Rays* e observe o comportamento do feixe *laser* no interferômetro. Depois, selecione novamente essa opção para desativar esse comando.
- 5- O que ocorre com a luz em BS1 e BS2? E em M1 e M2?

Dica 1: Vamos identificar os caminhos da luz no interferômetro por: caminho A (BS1, M1, BS2) e caminho B (BS1, M2, BS2).

Dica 2: Um espelho semirrefletor, também chamado divisor de feixe, “divide” a luz incidente em dois componentes, transmitindo 50 por cento da intensidade da luz incidente e refletindo outros 50 por cento (mas pode ser configurado para transmitir e refletir em proporções diferentes dessa).

- 6- Na janela *Source*, selecione a opção *laser* e ligue a fonte.
- 6.1- O que representam estas figuras?
- 6.2- Como podemos explicar a formação das figuras nos anteparos?

Dica 3: Cada reflexão nos espelhos introduz uma mudança de fase na luz que corresponde a uma diferença de caminho igual a $\lambda/2$. Nos espelhos semirrefletores essa mudança de fase corresponde a uma diferença de caminho igual a $\lambda/4$ desta radiação.

- 7- Retire o segundo divisor de feixe do interferômetro (opção *Beam Splitter 2* localizada na janela *Instruments*) e observe os anteparos.
- 7.1- Qual o papel desempenhado por esse dispositivo?

- 8- Na janela *Instruments*, através da opção *Polaroid Filter A*, introduza um filtro polaroide no caminho A, indicando o valor 45.

- 8.1- O que significa este valor?
- 8.2- Qual a função de um filtro polaroide?
- 8.2- O que pode-se observar em cada anteparo?
- 8.3- Que explicação podemos dar para a alteração nos padrões de interferência?
- 9-** Introduza um polaroide no caminho B, com ângulo de polarização de 90 graus.
- 9.1- O que podemos observar em cada anteparo?
- 9.2- Que explicação podemos dar para a alteração nos padrões de interferência?
- 10-** Retire todos os polaroides do interferômetro e recoloque o espelho semirrefletor 2.
- 11-** Insira o polaroide no caminho A, com orientação de 90 graus.
- 11.1- Como se comportam as figuras nos anteparos? Por que é obtido este padrão?
- 12-** Ainda com o polaroide no caminho A, insira o polaroide no caminho B, com uma orientação de 45 graus.
- 12.1- Como se comportam as figuras nos anteparos? Por que é obtido este padrão?
- 13-** Altere a orientação do polaroide no caminho A para 135 graus.
- 13.1- Como se comportam as figuras nos anteparos? Por que é obtido este padrão?
- 14-** Mantenha o polaroide A em 135 graus e o polaroide B em 45 graus. Introduza o polaroide 1 com orientação de 90 graus.
- 14.1- Como se comportam as figuras nos anteparos? Por que é obtido este padrão?

APÊNDICE F

Segunda etapa da coleta de dados

ROTEIRO EXPLORATÓRIO II

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Regime quântico

A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime quântico (como nos experimentos de Alain Aspect e seus colaboradores). No regime quântico, ou regime monofotônico, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez.

- 1- Localize o arquivo *Mach-Zehnder.exe* na área de trabalho.
- 2- Com o *software* aberto, aumente o nível de *zoom* através do botão central do *mouse*.
- 3- Na janela *Instruments*, substitua os anteparos por detectores selecionando a opção *Detector 1 and 2*.
- 4- Na janela *Source*, coloque o valor 500 na opção *Photons/Step* e em seguida ligue a fonte. Observe os detectores e também a contagem de fótons na janela *Photon Counters*.
 - 4.1- O que ocorre com a contagem de fótons nos detectores?
 - 4.2 Por que este padrão de detecções é obtido?

Dica 1: Observe o símbolo na fonte, que indica um feixe de fótons colimado.

- 5- Considerando as condições do item anterior, ao se escolher um fóton qualquer detectado:
 - 5.1- É possível inferir qual dos caminhos ele tomou no interferômetro?
 - 5.2- A distribuição das detecções revela interferência? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular?

Dica 2: A **distinguibilidade** se refere ao fato de o observador ter **informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons**. Distinguibilidade igual a zero significa que não há informação disponível e quando for 1 implica em total informação disponível.

- 6- Através da janela *Instruments*, em *Demolition Detectors* marque a opção *Detector A* para inserir um detector demolição no caminho A.
- 7- Observe os detectores e a contagem de fótons. Na janela *Photon Counters*, use a barra de rolagem para localizar a contagem de fótons no detector A.

7.1- Qual o caminho tomado por um fóton qualquer que chega aos detectores D1 e D2?
7.2- A distribuição das detecções revela interferência? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular?

8- Retire o detector do caminho A e também o espelho semirrefletor 2 (desmarque a opção *Beam Splitter 2*) e observe a distribuição das detecções.

8.1- É possível inferir qual o caminho tomado por um fóton detectado no detector 1, ou no detector 2?

8.2- A distribuição das detecções revela interferência? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular?

8.3- Que relação pode-se identificar entre o fato de o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular e o valor da distinguibilidade?

9- Recoloque o espelho semirrefletor 2 no interferômetro.

10- Através da janela *Instruments*, em *Non-Demolition Detectors* marque a opção *Detector A* para inserir um detector não-demolição no caminho A. Na janela *Photon Counters*, use a barra de rolagem para localizar a contagem de fótons no detector não-demolição.

10.1- A distribuição das detecções revela interferência? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular? Há informação disponível em relação ao caminho tomado pelos fótons?

Dica 3: O detector não-demolição é capaz de detectar os fótons sem absorvê-los.

Fenômenos intermediários

Wootters e Zurek (1979), em artigo publicado na *Physical Review D*, foram os primeiros a demonstrar a existência dos fenômenos intermediários. No contexto da Física Quântica, o que se entende por fenômenos intermediários? Vamos continuar utilizando o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder e tentar entender esta classe de fenômenos.

11- Desligue a fonte, clique em *Reset* (janela *Source*) e depois substitua os detectores 1 e 2 por anteparos (janela *Instruments*, opção *Screens 1 and 2*). Altere o número de fótons emitidos para 1000 fótons/segundo.

12- Ligue a fonte e observe os anteparos. Observe também a contagem de fótons indicada nos anteparos e a distinguibilidade (janela *Photon Counters*).

13- Considerando as condições do item anterior, ao se escolher um fóton qualquer detectado:

13.1- É possível inferir qual dos caminhos ele tomou no interferômetro?

13.2- A distribuição das detecções revela interferência? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular? Que relação isto tem com a informação disponível acerca do caminho tomado pelos fótons no interferômetro?

13.3- Como os valores de distinguibilidade e visibilidade relacionam-se entre si? Explique em termos da informação disponível ao observador.

Dica 4: Na janela *Instruments*, use a barra de rolagem para localizar a variável que indica a visibilidade (V_1 e V_2) dos padrões obtidos nos respectivos anteparos. A visibilidade se refere ao contraste do padrão obtido nos anteparos.

14- Na janela *Instruments*, localize as variáveis de entrada R_1 e R_2 (coeficientes de reflexão nos respectivos espelhos semirrefletores). Na opção R_1 , digite o valor 0,80 e clique em *Reset* para atualizar as detecções.

14.1- Ao comparar este padrão de detecções com o padrão obtido no item anterior, quais as implicações da alteração realizada em R_1 em termos de informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons?

14.2- O fenômeno observado é ondulatório ou corpuscular?

14.3- Qual o impacto desta alteração em termos de visibilidade da figura obtida nos anteparos?

14.4- Há alguma relação entre a distinguibilidade e o número de detecções nos anteparos? Explique.

15- Altere R_1 para 0,90 e R_2 para 0,10. Clique em *Reset* para atualizar as detecções e compare a visibilidade e a distinguibilidade em cada anteparo.

15.1- O padrão de detecções nos anteparos revela fenômeno ondulatório ou corpuscular? Explique em termos da informação disponível ao observador quanto ao caminho tomado pelos fótons no interferômetro.

16- Mantenha $R_2 = 0,10$ e altere R_1 para 0,10. Clique em *Reset* para atualizar as detecções e compare a visibilidade e a distinguibilidade em cada anteparo.

16.1- Compare os padrões obtidos nos anteparos com a questão anterior e discuta em termos da informação disponível ao observador quanto ao caminho tomado pelos fótons no interferômetro.

APÊNDICE G

Terceira etapa da coleta de dados

ROTEIRO EXPLORATÓRIO II

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Regime quântico

A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime quântico (como nos experimentos de Alain Aspect e seus colaboradores). No regime quântico, ou regime monofotônico, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido pela fonte de cada vez.

- 1- Localize o arquivo *Mach-Zehnder.exe* na área de trabalho.
- 2- Com o *software* aberto, aumente o nível de *zoom* para facilitar a visualização das estruturas do interferômetro.
- 3- Certifique-se de que a fonte está na opção *Single Photons*.
- 4- Na janela *Instruments*, substitua os anteparos por detectores através da opção *Detector 1 and 2*.
- 5- Na janela *Source*, coloque o valor 1 na opção *Photons/Step* e ligue a fonte. Observe os detectores e a contagem de fótons.
 - 5.1- O que ocorre com a contagem de fótons nos detectores?
 - 5.2 Por que acende somente a lâmpada do detector 1?

Dica 1: Observe o símbolo na fonte, que indica um feixe de fótons colimado.

- 6- Considerando as condições do item anterior, ao se escolher um fóton qualquer detectado:
 - 6.1- É possível inferir qual dos caminhos ele tomou no interferômetro? Justifique.
 - 6.2- A distribuição das detecções revela interferência? Por quê? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular?

Dica 2: A **distinguibilidade** se refere ao fato de o observador ter **informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons**. Distinguibilidade igual a zero significa que não há informação disponível e quando for 1 implica em total informação disponível.

- 7- Através da janela *Instruments*, em *Demolition Detectors* marque a opção *Detector A* para inserir um detector demolição no caminho A.

8- Observe os detectores e a contagem de fótons.

8.1- Qual o caminho tomado por um fóton qualquer que chega aos detectores D1 e D2? Justifique.

8.2- Que tipo de alteração é observada nos detectores e como isto pode estar relacionado com o fato de o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular?

8.3- Compare as respostas dos itens 6.2 e 8.2. O que você entende sobre isso?

9- Retire o detector do caminho A e o segundo divisor de feixe.

9.1- É possível inferir qual o caminho tomado por um fóton detectado no detector 1, ou no detector 2? Justifique.

9.2- Qual o comportamento do fenômeno observado? Há alguma inconsistência em relação às respostas dos itens 6.2 e 8.2? Como você concebe a existência destes fenômenos?

9.3- Como se comportam a visibilidade dos padrões observados e a distinguibilidade nas situações propostas nas questões 6, 8 e 9? Como podemos relacionar a visibilidade e a distinguibilidade com as alterações nos padrões observados?

Dica 3: A **visibilidade** refere-se ao **contraste do padrão de interferência** nos anteparos. Visibilidade igual a 1 significa que o padrão é perfeitamente nítido, apresentando contraste máximo entre as regiões de máximos e mínimos de interferência. Na janela *Instruments*, use a barra de rolagem para localizar as variáveis que indicam as visibilidades (V_1 e V_2) dos padrões obtidos nos respectivos anteparos.

10- Recoloque o segundo divisor de feixe no interferômetro.

11- Através da janela *Instruments*, em *Non-Demolition Detectors* insira um detector não-demolição no caminho A e observe a contagem de fótons nesse detector.

11.1- Considerando o padrão de detecções observado na questão 6, a presença desse detector promove alguma alteração no padrão de detecções? Justifique.

11.2- Comparando com as detecções observadas a partir das questões 6, 8 e 9, que explicação podemos dar para as alterações ocorridas nos padrões observados? Como você interpreta o comportamento dos fenômenos a partir da informação disponível em relação ao caminho tomado pelos fótons nas diferentes situações?

Dica 4: O detector não-demolição é capaz de detectar os fótons sem alterar o seu estado translacional.

Fenômenos intermediários

Wootters e Zurek (1979)⁸⁵, em artigo publicado na *Physical Review D*, foram os primeiros a demonstrar a existência dos fenômenos intermediários. No contexto da Física

⁸⁵ WOOTTERS, W. K.; ZUREK, W. H. Complementarity in the double-slit experiment: Quantum nonseparability and a quantitative statement of Bohr's principle. **Physical Review D**, v. 19, n. 2, p. 473–484. 1979.

Quântica, o que se entende por fenômenos intermediários? Vamos continuar utilizando o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder e tentar entender essa classe de fenômenos.

12- Retire o detector não-demolição e altere o número de fótons emitidos para 1000 fótons/segundo.

13- Observe os anteparos e a contagem de fótons indicada em cada um.

14- Considerando as condições do item anterior, ao se escolher um fóton qualquer detectado:

14.1- É possível inferir qual dos caminhos ele tomou no interferômetro?

14.2- A distribuição das detecções revela interferência? O fenômeno é ondulatório ou corpuscular? Que relação isto tem com a informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons no interferômetro?

14.3- Como os valores de distinguibilidade e visibilidade relacionam-se entre si? Explique em termos da informação disponível ao observador.

15- Na janela *Instruments*, localize as variáveis de entrada R_1 e R_2 (coeficientes de reflexão nos respectivos divisores de feixe) e altere R_1 para 0,80.

15.1- Ao comparar este padrão de detecções com o padrão obtido para $R_1 = 0,50$, quais as implicações da alteração realizada em R_1 em termos de informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons?

15.2- O fenômeno observado é ondulatório ou corpuscular?

15.3- Qual o impacto dessa alteração em termos de visibilidade da figura obtida nos anteparos?

16- Utilize agora $R_1 = 0,10$ e $R_2 = 0,90$ e compare a visibilidade e a distinguibilidade em cada anteparo.

16.1- O padrão de detecções nos anteparos revela um fenômeno ondulatório ou corpuscular? Explique em termos da informação disponível ao observador quanto ao caminho tomado pelos fótons no interferômetro.

17- Mantenha $R_2 = 0,10$ e altere R_1 para 0,10. Compare a visibilidade e a distinguibilidade em cada anteparo.

17.1- Compare os padrões obtidos nos anteparos com aqueles obtidos na questão anterior e discuta em termos da informação disponível ao observador quanto ao caminho tomado pelos fótons no interferômetro.

18- Altere os valores dos coeficientes de reflexão para $R_1 = 0,85$ e $R_2 = 0,40$.

18.1- O que significam os valores intermediários para a distinguibilidade e a visibilidade em cada anteparo?

18.2- A natureza dos fenômenos é ondulatória ou corpuscular? Que explicação podemos dar para o fenômeno observado?

18.3- Como podemos conciliar esses padrões?

APÊNDICE H

Terceira etapa da coleta de dados

ROTEIRO EXPLORATÓRIO III

Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Emaranhamento quântico

Em 1935, Albert **E**instein, Boris **P**odolsky e Nathan **R**osen propuseram um experimento mental (conhecido como paradoxo EPR), no qual defendiam que a Mecânica Quântica era uma teoria física incompleta. Propunham que esta era uma teoria realista e local e, por isso, não descrevia adequadamente os sistemas quânticos como, por exemplo, a medição realizada em partes separadas do sistema (para quaisquer distâncias). Será que Einstein, Podolsky e Rosen estavam certos? Como a FQ explica, ou não explica, este paradoxo?

- 1- Localize o arquivo *Mach-Zehnder.exe* na área de trabalho.
- 2- Com o *software* aberto, aumente o nível de *zoom* para facilitar a visualização das estruturas do interferômetro.
- 3- Certifique-se de que a fonte está na opção *Single Photons*.
- 4- Considere a seguinte configuração: $R_1 = 0,50$ e $R_2 = 0$, polaroide A orientado a 90 graus e polaroide B orientado a 0 graus.
 - 4.1- Como você espera que ocorra a distribuição das detecções?
 - 4.2- **Ligue** o interferômetro e tente explicar o que você observou.
- 5- Marque a opção *Entanglement* e observe os dispositivos presentes no interferômetro, procurando identificá-los.
- 6- O primeiro divisor de feixe foi substituído por um dispositivo capaz de produzir um par de fótons⁸⁶, a partir de apenas um fóton emitido pela fonte.
- 7- Mantenha a fonte **desligada**. Com os dois polaroides orientados a zero graus, como você espera que ocorram as detecções?

⁸⁶ Isso pode ser feito, por exemplo, incidindo um feixe *laser* sobre um cristal não-linear (KDP). Este, transforma cada fóton incidente em dois fótons, gerados simultaneamente com, aproximadamente, metade da energia do fóton incidente e que tomam caminhos correlacionados (conversão paramétrica descendente) (PESSOA JR., 2005, p. 11).

8- Na opção *Photon/Step* digite 1.

9- Ligue a fonte e observe as contagens de fótons nos detectores e nos polaroides.

9.1- Como se relacionam o número de fótons emitidos pela fonte e o número de pares detectados, ou absorvidos?

9.2- Ocorrem detecções simultâneas? Como você explica isso?

10- Desligue a fonte e coloque os dois polaroides orientados a 45 graus.

10.1- O que se esperaria em relação às contagens nos detectores e polaroides?

11- Ligue a fonte e observe as detecções.

11.1- Como se relacionam o número de fótons emitidos pela fonte e o número de pares detectados, ou absorvidos?

11.2- Ocorrem detecções simultâneas? Como você explica isso?

12- Desligue a fonte e altere a orientação dos dois polaroides para 90 graus.

12.1- O que se esperaria em relação às contagens nos detectores e polaroides?

13- Ligue a fonte e observe as contagens de fótons nos detectores e nos polaroides.

13.1- Como se relacionam o número de fótons emitidos pela fonte e o número de fótons detectados, ou absorvidos?

14- Desligue a fonte.

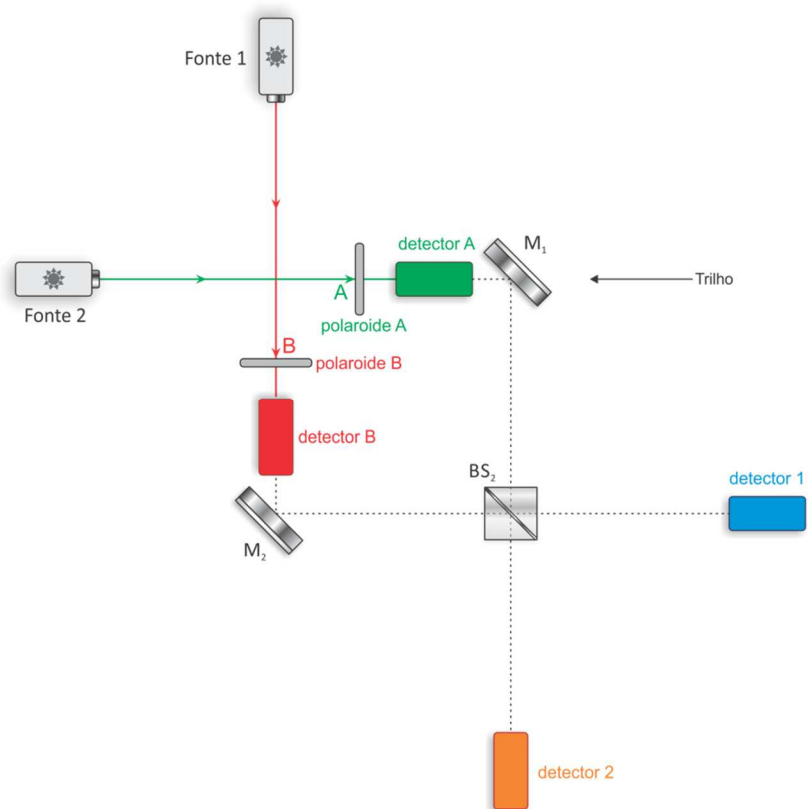
15- O que você espera em relação às contagens nos detectores e polaroides na situação onde um dos polaroides está a zero graus e o outro a 90 graus?

16- Com a fonte ainda **desligada**, analise novamente o item 4 no que diz respeito ao polaroide orientado a 90 graus e compare com a descrição do comportamento dos fótons no item 15.

17- Considere a seguinte alteração no interferômetro, conforme a figura: são utilizadas duas fontes que emitem fótons com a mesma polarização (quando uma fonte emite um fóton com polarização horizontal, a outra também emite com polarização horizontal, o mesmo ocorrendo para o caso da emissão de fótons com polarização vertical), e dois polaroides. Aproximadamente metade das vezes os fótons são produzidos com polarização horizontal e metade das vezes com polarização vertical.

17.1- O que se esperaria em relação à contagem de fótons detectados se os polaroides estivessem a zero graus e 90 graus?

17.2- E se ambos os polaroides estivessem a 45 graus?



18- Com o polaroide A orientado a 90 graus e o polaroide B a zero graus, **ligue** a fonte e observe a contagem dos pares de fótons nos detectores e polaroides.

18.1- Como você explica estas contagens nos detectores e polaroides?

18.2- Há alguma contradição em relação ao que foi observado no item 4 quando se considera a atuação do polaroide orientado em 90 graus?