



**Estratégias discursivas adotadas por professores em formação
na compreensão do fenômeno da complementaridade em
atividades didáticas mediadas pelo interferômetro virtual de
Mach-Zehnder**

**Discursive strategies adopted by pre-service teachers in understanding
the phenomenon of complementarity in learning activities mediated by
virtual Mach-Zehnder interferometer**

Jader da Silva Netto

Departamento de Ensino
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul
jader.neto@bento.ifrs.edu.br

Cláudio José de Holanda Cavalcanti

Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
claudio.cavalcanti@ufrgs.br

Fernanda Ostermann

Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
fernanda.ostermann@ufrgs.br

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados parciais de uma pesquisa de doutorado na qual estão sendo investigadas as estratégias discursivas adotadas por professores em formação na compreensão de alguns conceitos fundamentais de Física Quântica em atividades didáticas mediadas pelo software Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ). Essas atividades didáticas trataram a complementaridade onda-partícula, tese importante da Interpretação de Copenhague, de modo a abordar os fenômenos

intermediários de interferência quântica via simulação no IVMZ. À luz da teoria da mediação de Vygotsky e da filosofia translinguística de Bakhtin foram analisados os enunciados de uma dupla de estudantes durante atividades de simulação computacional mediadas também pelo uso de roteiros exploratórios concebidos para este fim. Os resultados indicam que a compreensão ativamente responsiva que ambos evidenciam em determinadas passagens ao longo dos extratos discursivos provavelmente deu suporte para que os estudantes tenham demonstrado mudanças discursivas importantes no processo de compreensão dos conceitos abordados nas atividades didáticas.

Palavras-chave: Formação de professores; Perspectiva sociocultural; Conceitos de Física Quântica.

Abstract

This paper presents partial results of a doctoral thesis, in which is being investigated discursive strategies adopted by pre-service teachers when they try to understand some fundamental concepts of Quantum Physics in didactic activities mediated by the Virtual Mach-Zehnder Interferometer (VMZI). These didactic activities were focused on the wave-particle complementarity, a key thesis of Copenhagen Interpretation, to deal with partial quantum interference phenomena, simulating it in VMZI. Grounded on the Vygotsky's mediation and Bakhtin's translinguistics theories, discursive interactions of a pair of pre-service teachers during computational simulation activities have been analyzed, also mediated by exploratory guidebooks designed for this purpose. The results have pointed that the actively responsive understanding stance manifested by pre-service teachers in some discursive excerpts, probably provide them basis in order that they could demonstrate important discursive changes in the understanding process of the main concepts addressed in the didactic activities.

Keywords: Training of pre-service teachers; Sociocultural perspective; Quantum Physics concepts.

Introdução

A necessidade de inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio já é consenso entre os pesquisadores em Ensino de Física, alguns dos quais também já estudaram as dificuldades enfrentadas pelos professores de ensino médio a respeito dessa inserção (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009a, 2009b; REZENDE JR.; SOUZA CRUZ, 2009). No Brasil, pode-se dizer que os estudos voltados à inserção da FMC nos currículos escolares do Ensino Médio, na década de 90, passaram por uma fase de justificativas sobre a importância desta temática e investigação sobre quais assuntos seriam de maior relevância e interesse (OSTERMANN, 1999a; PINTO; ZANETIC, 1999; TERRAZZAN, 1992, 1994) até a produção de material didático e sua implementação em sala de aula (FAGUNDES, 1997; OSTERMANN, 1999a, 1999b; OSTERMANN; CAVALCANTI, 1999; OSTERMANN; FERREIRA; CAVALCANTI, 1998; VALADARES; MOREIRA, 1998). A quantidade e diversidade de propostas para desenvolvimento de temas de FMC nos currículos escolares de ensino médio aumentou consideravelmente na última década, conforme pode-se observar a partir

da revisão da literatura proposta por Pereira e Ostermann (2009). Identificam-se vários trabalhos que relatam intervenções didáticas explorando temas de relatividade geral, supercondutividade e modelo atômico de Bohr, entretanto, poucos estão voltados a conceitos fundamentais da Física Quântica (FQ) mais atual¹.

Em relação aos livros didáticos de física que são utilizados no ensino médio, esta situação não é muito diferente. Com base em revisão dos livros didáticos de Física aprovados no Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) de 2012, realizada por Dominguni et al. (2012), verifica-se que estas obras praticamente não abordam conceitos fundamentais da FQ, ficando restritos apenas à chamada “velha” FQ, não indo além do átomo de Bohr.

Aliado a esta ausência de alguns temas importantes de FQ nos livros didáticos é preciso considerar outra questão, não menos importante: a formação do docente de Física no que se refere aos conceitos fundamentais de FQ. Como apontado na literatura, um dos aspectos que mais dificulta a inserção de conceitos de FQ no ensino médio é o fato do professor de Física não se sentir confortável em trabalhar com esse tema (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009a, 2009b; REZENDE JR.; SOUZA CRUZ, 2009). É necessário, portanto, investir esforços em investigar a compreensão dos conceitos fundamentais de FQ em contextos de formação de professores de Física, pois essa é uma forma de contribuir para que seja possível implementar um ensino de uma Física mais atual no nível médio. É nessa linha que se enquadra o presente trabalho.

Nesse sentido, Ostermann e Ricci (2005) analisam 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. (OSTERMANN; RICCI, 2005, p.11).

Assim, se o desejável é que os estudantes de ensino médio tenham contato significativo com uma física mais atual por meio do ensino de conceitos fundamentais de FQ, é essencial que o professor tenha uma formação que lhe proporcione um domínio mínimo desse tema (o que envolve domínio de ferramentas mediacionais e diversos recursos semióticos).

Para tal, optou-se por abordar aspectos considerados fundamentais: em uma primeira etapa a dualidade onda-partícula, considerada como a primeira revolução da FQ, e, em uma segunda etapa, o emaranhamento quântico, considerado a segunda revolução (ASPECT, 2006). Este artigo se concentra na primeira etapa, dando especial ênfase ao

¹ Daqui exclui-se a chamada *velha Física Quântica*, que neste trabalho se considera como aquela que engloba as 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.

princípio da complementaridade, um dos aspectos centrais da interpretação de Copenhagen².

A necessidade de se considerar a importância das interpretações reside no fato de que “possíveis transposições didáticas para o ensino médio dependem fortemente de uma sólida formação conceitual” (OSTERMANN; PRADO, 2005, p.194). Por exemplo, a discussão sobre a ontologia dos objetos quânticos, não é possível de ser feita sem a adoção de alguma interpretação³. O corpo teórico da FQ prevê o fenômeno da interferência quântica (o comportamento de um fóton único), no qual as interpretações vêm no sentido de atribuir ontologia ao objeto quântico (por exemplo, corpuscular, ondulatória ou dualista) e se alinhar a uma dada corrente epistemológica (por exemplo, realista ou antirrealista). A mais famosa delas, a Interpretação de Copenhagen, é ontologicamente dualista e epistemologicamente se alinha ao antirrealismo, sendo uma das mais bem sucedidas em auxiliar a teoria no sentido de explicar a interferência quântica e vários outros fenômenos (ver nota de rodapé 2).

Optou-se, neste trabalho, por abordar a dualidade onda-partícula já adotando-se uma interpretação (no caso, a interpretação de Copenhagen), tal como proposto por Greca e Freire Jr.(2011, 2014). Apesar de não haver consenso sobre qual a melhor interpretação para a FQ, a interpretação de Copenhagen ainda parece ser aquela que mais atrai os cientistas que atuam na pesquisa sobre os fundamentos da FQ, seguida pela interpretação dos muitos mundos (SCHLOSSHAUER; KOFLER; ZEILINGER, 2013). A escolha de estudar a complementaridade do segundo tipo também vem do fato dela poder ser quantificada no contexto da versão remodelada do *software* Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ) aqui utilizada. Essa quantificação foi implementada por meio da possibilidade de escolher o coeficiente de reflexão de cada divisor de feixe (LI; LIU; YU, 2012), bem como pela inclusão de detectores não-demolição nos braços do interferômetro. Isso abriu a possibilidade de explorar e investigar as interações discursivas dos alunos em atividades de ensino com foco na

² Estamos nos referindo aqui ao segundo tipo de complementaridade postulado por Bohr (PESSOA JR., 2003, p.94), que seria basicamente a complementaridade entre comportamentos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos (BOHR, 1928, 1937, 1948). Auletta, Fortunato e Parisi(2009, p.19) enuncia a complementaridade entre os comportamentos ondulatório e corpuscular da seguinte forma, no contexto de um Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ): “o completo conhecimento sobre o caminho não é compatível com a presença de interferência”. Pode-se entender a palavra “caminho” como estando associada a um estado translacional associado ao fóton no IMZ, como definido por Dirac (1958, p.7). Essa noção de caminho não é aplicável a todos os sistemas quânticos. A interferência quântica é uma consequência da superposição coerente de estados, não necessariamente vinculados a estados translacionais, e pode ocorrer em uma grande variedade de situações – por exemplo, no fenômeno dos batimentos quânticos (quantum beats), os mesmos podem aparecer ou não, dependendo de como o átomo evolui entre o estado inicial e final, processo que não envolve estados translacionais. Para maiores detalhes sobre esse assunto, o leitor pode consultar a obra de Greenstein e Zajonc(2006, p.104-110).

³ Segundo Montenegro e Pessoa Jr. (2002), pode-se adotar a interpretação não como uma (nova) teoria, mas como um conjunto de teses que, em conjunto com o formalismo matemático da teoria, estabelece uma conexão entre esse formalismo e os fenômenos observados, normalmente não afetando as previsões observacionais da teoria. Nessa mesma linha, Muyenck(2004, p.xxi, prefácio) afirma que sem as interpretações a Física Quântica seria “apenas matemática”. Para tornar “físico” o formalismo da Física Quântica, uma relação dos entes desse formalismo com os fenômenos tipicamente quânticos deve ser esboçada e, para tanto, é essencial uma interpretação, mesmo que seja instrumentalista.

complementaridade onda-partícula, envolvendo os fenômenos intermediários de interferência quântica⁴.

A pesquisa descrita neste artigo tem como objetivo investigar as estratégias discursivas adotadas por professores em formação na compreensão de alguns conceitos fundamentais da FQ. É uma pesquisa de natureza qualitativa e tem como referencial teórico-metodológico a teoria da mediação de Vygotsky e a filosofia translinguística de Bakhtin. À luz de conceitos bakhtinianos como enunciado, compreensão responsiva e vozes, são analisadas as interações discursivas que ocorrem entre estudantes que trabalham em duplas com um *software*, o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IVMZ), que simula o Interferômetro de Mach-Zehnder e com roteiros exploratórios preparados para as atividades.

A partir da versão original, do *software* produzida em 2005, diversas melhorias foram introduzidas⁵. Além da mudança do *layout*, o *software* permite que o usuário compare os valores previstos teoricamente para a contagem de fótons nos anteparos ou detectores com aqueles obtidos na simulação. Também é possível 'tornar disponível' informação sobre o caminho associado ao fóton no interferômetro alterando-se os coeficientes de reflexão (R_1 e R_2) e, conseqüentemente, os coeficientes de transmissão (pois $T_1 = 1 - R_1$ e $T_2 = 1 - R_2$) dos divisores de feixe para valores distintos de $1/2$, o que possibilita explorar novos conceitos como, por exemplo, a complementaridade entre comportamentos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos. Temas atuais de FQ relacionados aos processos de medição podem ser explorados a partir da análise do comportamento dos fótons com a inserção de detectores não-demolição⁶ nos braços do interferômetro. Na atualização mais recente do *software* é possível simular o fenômeno do emaranhamento quântico a partir da polarização de um par de fótons correlacionados.

A intervenção didática foi realizada em uma disciplina de Física Moderna de um curso de Licenciatura em Física ofertado em uma instituição pública de ensino do Rio Grande do Sul. Foram selecionados para análise alguns trechos das interações discursivas entre os estudantes (denominados E_1 , E_2 , E_3 , ...). A partir deste estudo pretende-se trazer contribuições para a área que possam resultar em melhorias no que se refere à formação docente em FQ.

⁴ A primeira proposta experimental para observar fenômenos de interferência quântica intermediários é de autoria de Wootters e Zurek(1979), os quais também quantificaram a complementaridade onda-partícula. Desde então, o princípio da complementaridade ganhou ampla atenção e foram deduzidas relações matemáticas entre visibilidade (ou contraste) do padrão de interferência e a distinguibilidade de caminho, a chamada relação de dualidade (ENGLERT, 1996; ENGLERT; BERGOU, 2000; GREENBERGER; YASIN, 1988; JAEGER; SHIMONY; VAIDMAN, 1995). A distinguibilidade e a visibilidade são muito importantes para quantificar o comportamento ondulatório e corpuscular do objeto quântico, especialmente em situações intermediárias (nas quais a visibilidade é inferior a um).

⁵ Esta readequação do *software* faz parte de um projeto coordenado pelos professores Fernanda Ostermann e Cláudio Cavalcanti do IF/UFRGS e financiado pelo CNPq através do Edital Universal 014/2011.

⁶ O detector não-demolição é um dispositivo que detecta o fóton sem destruí-lo (por exemplo, absorvendo-o). Sua presença no interferômetro não altera a distribuição de fótons entre os dois caminhos, entretanto, afeta a visibilidade do padrão de interferência.

A formação docente em Física Quântica e a literatura: como a investigação do presente trabalho pretende contribuir?

Como já citado, alguns autores destacam a necessidade de pesquisas sobre a apropriação dos conceitos fundamentais da FQ em contextos de formação de docentes de Física (MONTEIRO; NARDI; BASTOS FILHO, 2009a,2009b; REZENDE JR.; SOUZA CRUZ, 2009). Recorrendo-se a periódicos de pesquisa em ensino de ciências, nacionais e internacionais, com classificação *Qualis* A1, A2 e B1, a partir do ano 2000, verificou-se a existência de quatorze trabalhos publicados tendo como foco essa temática.

Os artigos encontrados foram organizados em categorias após sua análise, sendo assim distribuídos: propostas didáticas testadas em sala de aula, trabalhos de revisão, artigos de pesquisa, desenvolvimentos experimentais e levantamento de concepções em FQ. Estas categorias foram inspiradas em estudo anterior realizado por Pereira e Ostermann (2009), no qual os autores analisaram a produção acadêmica no período de 2001 a 2006 a partir da consulta a artigos das principais revistas da área de ensino de ciências do Brasil e do exterior, identificando apenas quatro trabalhos sobre ensino de FQ com foco em formação de professores de Física.

Comparando as duas análises, pode-se dizer que houve um aumento considerável no quantitativo de trabalhos voltados à formação docente em FQ, visto que na revisão realizada no âmbito deste estudo foram identificados dez novos trabalhos.

Ao analisarem-se estes quatorze trabalhos voltados à formação de professores em FQ, identificou-se que dez deles estão baseados no uso de recursos computacionais, sendo o Interferômetro de Mach-Zehnder utilizado como uma ferramenta mediadora em todos eles (OSTERMANN et al., 2009; OSTERMANN; PRADO, 2005; OSTERMANN; PRADO; RICCI, 2008; OSTERMANN; RICCI, 2004, 2005; PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009a, 2009b, 2011, 2012; PEREIRA; PESSOA JR. et al., 2012).

Estudos voltados a como implementar fundamentos da FQ na formação docente são, portanto, bem-vindos, sendo nesse campo que a presente investigação pretende contribuir.

Referencial teórico-metodológico

A escolha por um referencial teórico centrado em conceitos da teoria de Vygotsky e na filosofia translinguística de Bakhtin se justifica na crença de que a análise de situações isoladas conduz à produção de conhecimentos fragmentados acerca do objeto de investigação que, fundamentalmente, é a apropriação dos conceitos físicos dos fundamentos de FQ por parte dos professores em formação. Ou seja, defende-se que a análise dessa apropriação não pode ser realizada simplesmente considerando o desempenho de cada indivíduo em atividades didáticas concebidas e avaliadas isoladamente (por exemplo, um pré-teste e um pós-teste), mas fazendo uma análise processual, analisando ao longo de toda a unidade didática as interações discursivas entre indivíduos do grupo pesquisado.

A mediação em Vygotsky

A teoria de Vygotsky tinha o propósito de compreender a psique humana e se apoia fortemente no pensamento marxista (FU, 1997; KOZULIN, 1999; KOZULIN et al., 2003; LIMA JR.; OSTERMANN; REZENDE, 2014). Vygotsky, adotando a ideia de Marx, assume que a consciência humana é moldada por fenômenos sociais e é por meio do trabalho e de ferramentas materiais que se modifica o mundo natural. Essas ferramentas, que Vygotsky denomina ferramentas culturais (por serem socioculturalmente situadas), são elementos essenciais na atividade humana. Em seus trabalhos, Vygotsky procurou caracterizar os aspectos puramente humanos do comportamento e compreender a formação destas características ao longo da história concedendo considerável importância à observação dos indivíduos durante o seu processo de mudança. Tanto o contexto social quanto histórico influenciam diretamente o desenvolvimento psicológico e, portanto, não devem ser analisados separadamente.

Destaca-se o papel da linguagem nesse processo, pois ela pode ser considerada como sendo a principal ferramenta cultural (de mediação) presente nos elos comunicativos entre os seres humanos, tendo papel fundamental no desenvolvimento psicológico individual e coletivo (VYGOTSKY, 1998). Individual porque as informações intermediadas 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.

Na perspectiva da ação mediada, o conhecimento não é o resultado de uma ação dos sujeitos sobre os objetos, mas de uma interação mediada por ferramentas culturais, ou seja, não se tem acesso direto aos objetos de conhecimento, mas uma forma de acesso mediado, possibilitado pelos sistemas simbólicos presentes em um dado contexto sociocultural.

Para Vygotsky, aprendizagem e desenvolvimento não são coincidentes – 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 (VYGOTSKY, 1994). Esse processo pode ocorrer mediante o estabelecimento de uma complexa interação entre o indivíduo e o contexto sociocultural, o que requer a presença do ‘parceiro mais capaz’ (indivíduo que domina um maior repertório de ferramentas culturais, por exemplo, um professor ou mesmo um colega). É nesse contexto que Vygotsky propõe o conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) (RIO; ÁLVAREZ, 2007), que é central quando se pensa em aprendizagem, ou seja, qualquer situação de ensino deve ser planejada levando-a em consideração.

A ZDP tem especial importância para a compreensão do desenvolvimento mental dos indivíduos, uma vez que possibilita que os processos anteriormente vivenciados socialmente em interações interpessoais (no plano interpsicológico) sejam internalizados, isto é, reelaborados no plano intrapessoal (intrapsicológico). Esse processo de reelaboração ocorre pela interação com parceiros mais experientes no uso das ferramentas mediacionais características de uma determinada cultura.

No âmbito da pesquisa realizada, entende-se que a simulação com o IVMZ é uma ferramenta mediadora. Este caráter atribuído ao *software* deve-se ao fato de este exigir do usuário o controle sobre as diversas situações possíveis na simulação computacional (instrumento) e também pelo uso intensivo de linguagem não verbal, símbolos, padrões de interferência e imagem animada tridimensional do interferômetro (signos de natureza multissemiótica), auxiliando na aprendizagem dos conceitos abordados. 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 promove o compartilhamento de significados. Para viabilizar a compreensão do intercâmbio de significados entre os estudantes nas interações discursivas, recorreu-se à análise bakhtiniana.

A análise bakhtiniana

A língua, de acordo com o Círculo de Bakhtin⁷, não pode ser pensada como um mero sistema simbólico abstrato, mas como atividade humana, na qual se reconhece a linguagem como um produto da interação social, das condições materiais e históricas em cada tempo. Assim, a fala tem natureza social, embora também se reconheça nela componentes individuais. Para Bakhtin, a propriedade mais significativa da língua como produto da interação social é o dialogismo. A respeito desta característica, Bakhtin propõe que “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” (BAKHTIN, 1997, p.319).

O dialogismo, um dos conceitos centrais da teoria bakhtiniana, é caracterizado pelo fato de que a negociação de sentidos estabelecida entre dois enunciados carrega consigo uma tensão própria, inerente ao caráter dialógico do processo de fala. Assim, a palavra é vista como um espaço de disputas em que entram em jogo valores sociais opostos.

É em função deste caráter dialógico do processo de fala, que Wertsch(1993) propõe que para a indagação ‘quem está falando?’ a resposta padrão é ‘pelo menos duas vozes’. Isto significa que o discurso está impregnado de relações com ideologias, normas culturais e outros aspectos que podem estar longe, espacial ou temporalmente, do contexto em que este se desenvolve. Os enunciados, portanto, revelam a sua não-neutralidade. Vozes podem ser entendidas como diferentes perspectivas ou pontos de vista sobre um conteúdo temático e se interanimam, polemizando-se, apoiando-se ou contrapondo-se.

Outra importante característica dos enunciados é o fato de estes despertarem uma compreensão responsiva (BAKHTIN, 1997), isto é, a preparação para uma resposta (outro enunciado, um gesto, o cumprimento de uma ordem). Ao responder um

⁷ 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 disputados. 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.

enunciado evocam-se os enunciados de outros e do próprio enunciador, de modo a veiculá-los no processo de comunicação discursiva, caracterizando o aparecimento das vozes discursivas. Assim, não há como se separar voz e enunciado, uma vez que este, seja oral ou escrito, sempre é expresso a partir de um ponto de vista (uma voz) (WERTSCH, 1993, p.71).

Como já citado, esse processo, no qual não é apenas uma voz a responsável pela criação de um enunciado, chama-se interanimação. Tomando como exemplo uma situação de ensino, pode-se identificar nos enunciados dos estudantes a voz do professor, dos livros didáticos, do seu contexto formativo ou da comunidade na qual estão inseridos. Esta multiplicidade de vozes que perpassa o discurso evidencia que o mesmo nunca está rigorosamente restrito ao contexto espacial e temporal no qual ele foi elaborado.

Desta forma, pode-se dizer que os enunciados, na concepção bakhtiniana, não podem ser separados das circunstâncias externas nas quais foram produzidos, pois estão circunscritos por um contexto, chamado *contexto extraverbal*. Este pode ser compreendido como o momento sócio-histórico-cultural em que estão situados os interlocutores.

Esta relação entre o enunciado e o contexto extraverbal exige que, para se compreender esse enunciado, seja necessário ir além da sua materialidade linguística e considerar sua produção no horizonte comum dos interlocutores, uma vez que “estabelecem uma miríade de conexões com o contexto extraverbal da vida, e, uma vez separados deste contexto, perdem quase toda a sua significação” (VOLOCHINOV, 1926). Assim, o enunciado molda o discurso transcendendo as simples formas gramaticais e representando o produto de relações entre indivíduos que interagem de diversas formas.

Neste processo dialógico que conforma as interações comunicativas,

De fato, o ouvinte que recebe e compreende a significação (linguística) de um discurso adota simultaneamente, para com este discurso, uma atitude responsiva ativa: ele concorda ou discorda (total ou parcialmente), completa, adapta, apronta-se para executar, etc., e esta atitude do ouvinte está em elaboração constante durante todo o processo de audição e de compreensão desde o início do discurso, às vezes já nas primeiras palavras emitidas pelo locutor. A compreensão de uma fala viva, de um enunciado vivo é sempre acompanhada de uma atitude responsiva ativa (conquanto o grau dessa atividade seja muito variável); toda compreensão é prehe de resposta e, de uma forma ou de outra, forçosamente a produz: o ouvinte torna-se o locutor (BAKHTIN, 1997, p.291).

A compreensão responsiva é um importante aspecto da teoria bakhtiniana no sentido de possibilitar a análise da evolução discursiva em um evento comunicativo e será considerado na análise das interações discursivas aqui apresentadas.

Procedimentos metodológicos

Considerando a relação entre o enunciado e o contexto extraverbal, ou seja, tudo aquilo que envolve a enunciação, nessa pesquisa procurou-se considerar o contexto

extraverbal imediato (ou situacional), aquele mais vinculado ao momento em que a atividade didática se desenvolveu. Em cada trecho da análise, na medida do possível foram feitas algumas inferências sobre o contexto extraverbal amplo (ou contexto sociocultural) e como esse contexto pode ter originado vozes que moldaram os discursos analisados.

Nas atividades didáticas, como ressaltado por Gee e Green (1998), cada dupla é encarada como constituída por membros de uma microcomunidade, com postura ativa nas práticas discursivas que surgem nos diversos eventos ao longo dessas atividades no sentido de se engajarem nessas práticas transformando esses discursos, elaborando construções e reconstruções dos significados relacionados aos conceitos físicos envolvidos, inseridos em contextos que se consistem em *oportunidades de aprendizagem*. Nessas oportunidades, portanto, as análises devem ser feitas momento por momento em qualquer prática discursiva (seja oral ou por textos escritos) entre a dupla (GEE; GREEN, 1998, p.148-149), no sentido de estudar as estratégias discursivas empregadas para a compreensão dos conceitos abordados. Assim, a pesquisa foi desenvolvida durante uma intervenção didática (11 horas-aula) com 8 estudantes matriculados na disciplina de *Física Moderna e Contemporânea I*, que integra o sexto semestre do curso de Licenciatura em Física ofertado em um campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul. Esta disciplina é o primeiro contato formal dos estudantes com a Física do século XX e foi conduzida sob um enfoque mais conceitual do que formal.

A ementa desta disciplina prioriza aspectos da Velha FQ, além de apresentar em seus conteúdos apenas a teoria de Schrödinger dos fenômenos quânticos. Para a realização da pesquisa, atualizou-se a ementa proposta e foi feita uma reestruturação de conteúdos de modo a levar para sala de aula uma visão mais atual da FQ. O IVMZ, como uma ferramenta mediadora, foi inserido como elemento central de estratégias que possibilitem a criação da ZDP, ou seja, por meio de atividades que despertem processos que podem operar apenas quando o aluno interage com um parceiro mais capaz, em um ambiente colaborativo (VYGOTSKY, 1994). Nesse sentido, explorou-se a complementaridade onda-partícula simulando a interferência quântica e os fenômenos intermediários com uso do *software*.

Inicialmente foi realizada uma exposição das primeiras teorias da FQ, contextualizando-a para promover discussões sobre a forma de interpretar os fenômenos físicos, repensando certos princípios da Física Clássica como o determinismo e a causalidade, direcionando as discussões para os fundamentos da FQ. Ao se situar historicamente os estudantes, pode-se 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.

Pode-se dizer que o cenário da pesquisa começou a ser delineado com o estudo do postulado de Louis de Broglie e sua interpretação realista-dualista da FQ e, em seguida, trabalhou-se brevemente a interpretação realista-ondulatória de Schrödinger com colapsos e sua formulação matemática para a FQ. O estudo da equação de Schrödinger foi conduzido tendo-se o objetivo de mostrar aos estudantes apenas aquilo que se julga essencial para sua formação inicial como licenciandos

(interpretando fisicamente as probabilidades que se obtêm das funções de onda que possam ser consideradas suas soluções fisicamente aceitáveis).

O ponto central da pesquisa 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, foi adotada a interpretação de Copenhagen para o fenômeno, tendo como foco a complementaridade onda-partícula, uma das suas teses centrais.

O estudo da complementaridade onda-partícula foi realizado 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. Foram ainda usados dois roteiros exploratórios como recursos mediacionais. Com o uso do primeiro os estudantes puderam explorar o IVMZ reconhecendo os dispositivos que o compõem e o papel desempenhado por cada um deles, além de simularem a interferência em regime clássico (luz *laser*). Esta atividade teve a duração de 3 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.

A partir das orientações do segundo roteiro exploratório os estudantes passaram a simular com o *software* em regime quântico (fótons únicos). Na primeira etapa da atividade (3 horas de duração), exploraram-se os caracteres ondulatório e corpuscular dos fenômenos. Na sequência das aulas (5 horas de duração), mediante a abordagem dos conceitos de visibilidade e distinguibilidade, simulou-se a interferência quântica através do estudo dos fenômenos intermediários. Para isso, como já dito, varia-se os coeficientes de reflexão e transmissão nos divisores de feixe. A figura 1 apresenta um esquema do interferômetro de Mach-Zehnder⁸.

A coleta de dados se deu em sala de aula, originada a partir de atividades mediadas pelo IVMZ e pelo uso de roteiros exploratórios. Durante a simulação com o *software* foi feita gravação de áudio dos diálogos entre os estudantes e destes com o professor, além de terem sido coletadas respostas às questões dos roteiros exploratórios.

⁸ Para uma explicação do seu funcionamento, ver os trabalhos de Pessoa Jr. (1997, 2006).

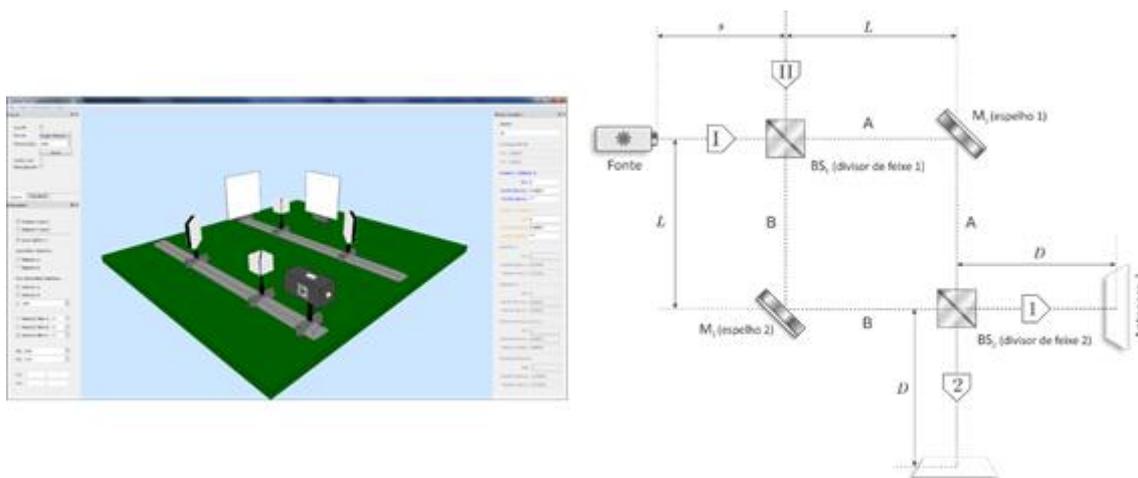


Figura 1: A tela inicial do IVMZ (esquerda) e um esquema do interferômetro de Mach-Zehnder (direita) – os divisores de feixe (BS1 e BS2) são cúbicos e simétricos, para evitar complicações físicas desnecessárias (HAMILTON, 2000; HOLBROW; GALVEZ; PARKS, 2002; ZEILINGER, 1981). Há duas portas de entrada (I e II) e duas portas de saída (1 e 2), nas quais podem ser colocados anteparos (como mostra a figura) ou detectores. Na figura, a fonte foi posicionada na porta de entrada I. As quantidades s , L e D são distâncias características do interferômetro (neste trabalho, será considerado que cada braço A e B tem igual comprimento $2L$).

Análise das interações discursivas

As interações discursivas entre os alunos gerou uma grande quantidade de dados coletados, impossibilitando que todos eles sejam apresentados apenas nesse trabalho. Desta forma, foi feita uma pré-análise dos enunciados e, em seguida, uma análise mais detalhada dos mesmos, trazendo para este artigo os enunciados de apenas uma dupla de estudantes, considerando-se a evolução dos mesmos nas diversas situações que vivenciaram. Os enunciados desses estudantes estão entre os mais ricos dentre os que foram coletados e transcritos.

Mediados pelo roteiro exploratório e simulando com o *software* (IVMZ), os estudantes começam a construir suas explicações para os fenômenos observados, apresentando graus variados de apropriação dos conceitos envolvidos. Torna-se interessante analisar este movimento que existe entre o momento em que os estudantes não sabem explicar e o momento no qual demonstram, de alguma forma, estar a caminho de compreender a situação que lhes foi proposta. Partindo do pressuposto de que “conhecimento e aprendizado são vistos como partes de um processo dinâmico, onde as relações são interpretadas a partir de encontros entre indivíduos e entre os indivíduos e o mundo” (WICKMAN; ÖSTMAN, 2002, p.603), pode-se argumentar em favor de entender o aprendizado como uma mudança discursiva e, para investigar o aprendizado como tal, será analisado como o processo de construção de significados relacionados aos conceitos físicos abordados evolui nas interações discursivas durante as atividades mediadas pelo *software*.

Resultados e discussão

Nesta seção são apresentados extratos das interações discursivas da dupla E5E6 selecionados a partir da relevância dos mesmos para compreensão do processo de apropriação dos conceitos em debate.

IVMZ em regime clássico

O estudante E₆ foi o responsável pela leitura do roteiro exploratório e E₅ estava em frente ao computador manipulando o *software*.

Contexto situacional I

Os estudantes foram desafiados a explicar a formação dos padrões de interferência nos anteparos, conforme ilustrado na figura 2. Aqui o interferômetro está no regime clássico (a fonte emite luz coerente – *laser*), ou seja, um número tão grande de pulsos monofotônicos por vez de modo que se forme um padrão de interferência contínuo nos anteparos (ver o detalhe da figura). Nessa situação $R_1 = R_2 = 0,5$.

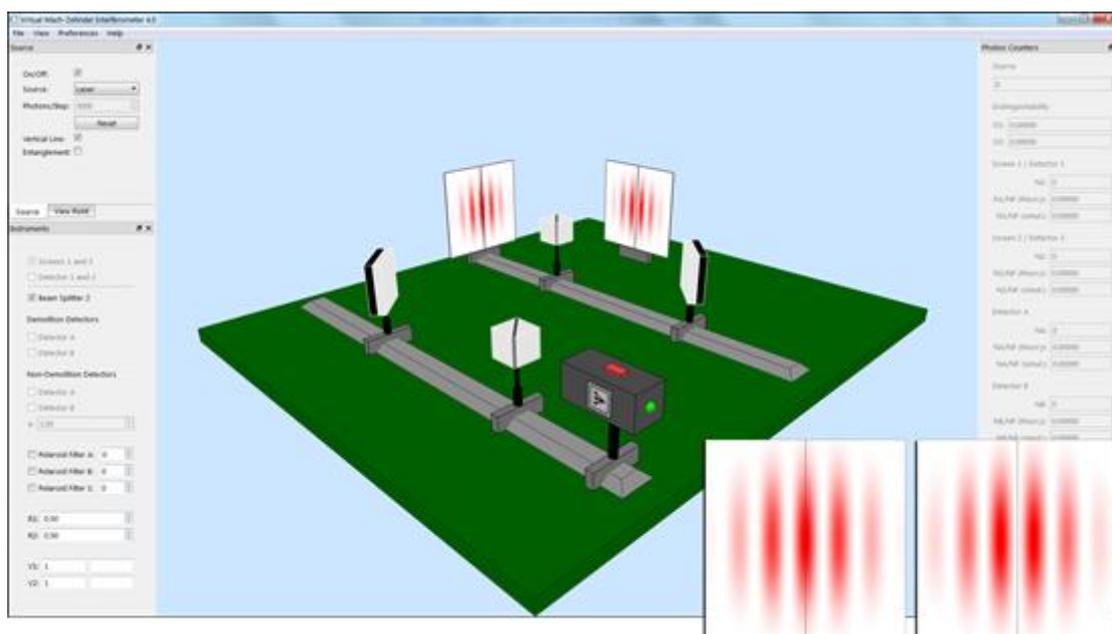


Figura 2: Simulação em regime clássico (luz *laser*). Note, no detalhe da figura, que os padrões nos anteparos são invertidos (onde há um máximo no anteparo 1 há um mínimo no anteparo 2 – uma linha vertical foi inserida no centro de cada anteparo para facilitar a visualização desse aspecto).

A análise dos enunciados destes estudantes com relação ao regime clássico do IVMZ evidencia que não houve interação entre eles, conforme identificado pelo áudio, apesar de estarem trabalhando em dupla. A partir do que foi observado na tela do computador, cada estudante fez suas anotações individualmente, as quais encontram-se nas figuras 3 e 4.

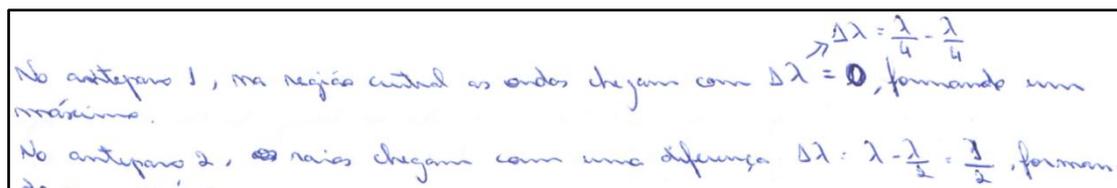


Figura 3: Explicação do estudante E5 para os padrões observados nos anteparos.

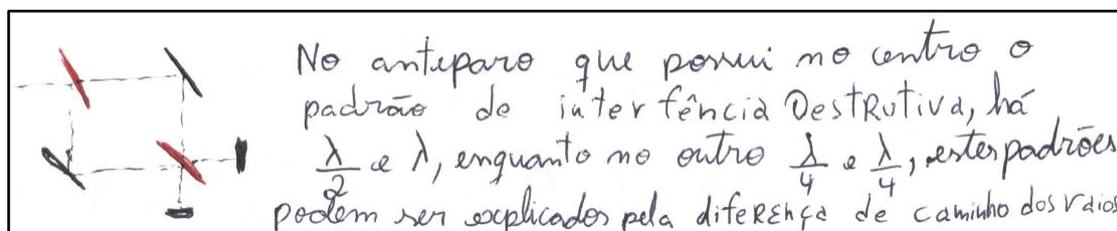


Figura 4: Explicação do estudante E6 para os padrões observados nos anteparos.

Comparando-se as explicações dadas pelos estudantes, pode-se observar que ambos se valem dos mesmos recursos semióticos⁹ para justificar os padrões de interferência nos anteparos recorrendo à óptica geométrica e usando a noção de raio de luz. No modelo clássico a interferência luminosa é um fenômeno devido ao caráter ondulatório da luz. Portanto, os estudantes foram parcialmente bem sucedidos em suas explicações. Isso permite identificar interanimação com vozes discursivas presentes em contextos anteriores, provavelmente retomando alguma aula de óptica ou livro didático com que tiveram contato. Ao se utilizar a noção de luz como onda para explicar os padrões de interferência, estes estudantes podem ter identificado os caminhos das frentes de onda como sendo raios de luz, que é uma voz claramente originada do contexto da óptica geométrica. Desta forma, apesar de terem explicado de forma parcialmente correta a formação dos padrões de interferência nos anteparos percebe-se a limitação desta explicação em função do contexto discursivo que atribui ao laser uma conotação puramente geométrica (raio).

Na sequência do roteiro exploratório (ver o próximo contexto situacional), com o *software* ainda em regime clássico, o estudante E₅ passa a se referir a feixes de luz, enquanto E₆ mantém suas explicações em termos de raios de luz.

Apesar de os estudantes usarem a noção intuitiva de 'raio de luz', característica da óptica geométrica, para se referir às componentes que seguem pelos braços do interferômetro, é no contexto da óptica ondulatória que se podem construir coletivamente cadeias de enunciados que levem à compreensão da formação dos padrões de interferência nos anteparos.

⁹ Nesse caso fazem uso principalmente das figuras de interferência e a representação pictórica do *laser* como raio, ao invés de uma onda eletromagnética.

IVMZ em regime quântico

Contexto situacional II

Os estudantes foram solicitados a explicar a distribuição das detecções de fótons nos anteparos, onde obtiveram um padrão de interferência semelhante ao obtido em regime clássico (ver figura 5). Nesse regime, a fonte emite um pulso monofotônico por vez, fazendo que o padrão de interferência não seja mais contínuo e se forme ponto a ponto (marcas da incidência de cada fóton no anteparo). Como nesse caso $R_1 = R_2 = 0,5$, não se pode associar uma trajetória a nenhum fóton (distinguidade é nula em ambos os anteparos), resultando em um padrão de interferência com visibilidade 1 em cada um dos anteparos.

1. *E₆: Bah, é igual o outro.*
2. *E₅: É, só que esse não se forma todo duma vez. É por pontos.*
3. *E₆: Esse é mais complicado.*
4. *E₅: Acho que tem que fazer que nem antes. Tem que ver a trajetória dos raios.*
5. *E₆: É, a trajetória. ... Tá mas aqui não dá pra ser raios.*
6. *E₅: Nem feixes. Tu tem alguma ideia?*
7. *E₆: ... Dá pra dizer que os fótons estão sendo divididos aqui [primeiro divisor de feixe]*
8. *sem falar em raios de luz.*
9. *E₅: Beleza, acho que é isso.*
10. *E₆: É melhor né, mas feixe de luz ou de fótons não é tão ruim também.*
11. *E₅: É, acho que dá pra deixar assim.*

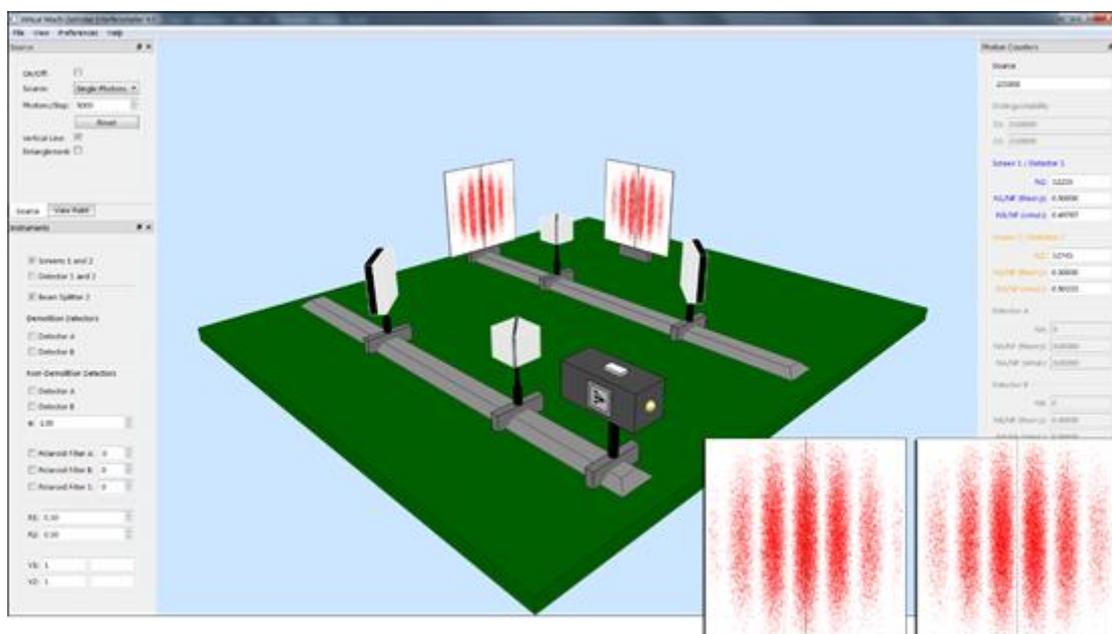


Figura 5: Simulação em regime quântico (fótons únicos). Note que o padrão se forma ponto a ponto nessa situação (ver os anteparos no detalhe).

A discussão entre os estudantes não chega a evoluir a ponto de explicar o fato de os padrões serem diferentes entre si em cada anteparo de modo que, mesmo tendo encerrado o diálogo, a questão permaneceu sem o encaminhamento de uma explicação para o fenômeno. Em termos do envolvimento nesta interação discursiva,

percebe-se que ambos os estudantes reconhecem a necessidade de se procurar novos termos para explicação do fenômeno. Enquanto o estudante E₅ procura organizar as ações da dupla E₆ é quem se sente convidado, ou desafiado, para responder à questão.

O enunciado de E₆ surpreende pela forma como a palavra ‘fóton’ surge no discurso, uma vez que na situação anterior a luz era tratada por este estudante como se fossem ‘raios de luz’. Provavelmente o estudante emprega essa voz (originada de um contexto externo mais amplo, provavelmente livros didáticos e/ou seu contexto formativo) como um recurso linguístico para deflagrar uma negociação de significados buscando a compreensão do motivo do padrão ser formado ponto por ponto nessa situação. Note que ele primeiramente nega a plausibilidade do argumento anterior que considerava a representação de raios (linha 5) e induz uma posição responsiva de E₅ no sentido de negar a natureza do fóton como feixes (linha 6).

Mesmo que o termo ‘feixes’ leve a uma representação análoga à representação simbólica da óptica geométrica para a luz (raios), ele pode estar sendo usado como estratégia discursiva para eliminar mais enfaticamente a possibilidade de construir significado relacionado a qualquer representação geométrica para explicar o fenômeno. Toda essa negociação parece auxiliar também E₅, quando afirma “Beleza, acho que é isso” (linha 9). Entretanto, E₆ volta a admitir a possibilidade de explicar o fenômeno por meio de uma representação geométrica (linha 10), induzindo uma postura responsiva de E₅, que se alia à sua voz (linha 11). Essa oscilação parece ser um sinal de que ainda não conseguiram entender bem o regime quântico, o que é esperado por ele ser bastante contraintuitivo.

Contexto situacional III

Foi solicitado aos estudantes que retirassem o divisor de feixe 2 (figura 6), substituíssem¹⁰ os anteparos por detectores e observassem a distribuição das detecções. A partir disso, deveriam identificar o caráter (ondulatório ou corpuscular) do fenômeno, além de relacionar esta caracterização com a distinguibilidade. O caráter ondulatório se estabelece na presença do segundo divisor de feixe quando $R_1 = R_2 = 0,5$, quando todos os fótons seriam acusados no detector 1 e nenhum no 2. Nessa situação proposta, aproximadamente 50 por cento dos fótons é acusada em cada detector, evidenciando o caráter corpuscular (pois pode-se associar com certeza um caminho para cada fóton que incide em cada detector)¹¹.

¹⁰Se fossem mantidos os anteparos, seriam formados dois padrões de detecção com visibilidade nula e distinguibilidade máxima a partir da detecção de, aproximadamente, metade do número de fótons em cada um.

¹¹Aqui, entra em cena o conceito de distinguibilidade de caminho, quantidade associada à probabilidade máxima de emitir um palpite correto sobre um fóton que produziu uma determinada marca em um dado anteparo (ou um sinal de detecção em um dos detectores). Essa quantidade é também uma medida do grau de caráter corpuscular do objeto quântico (no caso presente, o fóton). No contexto do IVMZ, pode-se partir de Hecht (2002) para calcular a intensidade normalizada em cada anteparo em função dos índices de reflexão e transmissão (coeficientes ReT) nos divisores de feixe e de Greenberger e Yasin (1988) para representar as visibilidades como $\mathcal{V} = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\grave{a}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\grave{a}n}}$. A desigualdade $\mathcal{D}^2 + \mathcal{V}^2 \leq 1$ (JAEGER; SHIMONY; VAIDMAN, 1995; ENGLERT, 1996) possibilita mostrar que as distinguibilidades em cada detector (ou anteparo) são dadas por $\mathcal{D}_1 = |R_2(1 - R_1) - R_1(1 - R_2)| / [R_2(1 - R_1) +$

12. E_5 : O que passa pelo [braço] A chega no D_2 [detector 2] e o que passa pelo [braço] B
13. chega no D_1 [detector 1].
14. E_6 : Isso eu também sei, mas tem que acrescentar aqui se é ondulatório ou não.
15. E_5 : Tá respondido, então. Coloca que é ondu/, corpuscular.
16. E_6 : Ahan. É um fóton né? Vai ser corpuscular.
17. E_5 : Nem sempre é assim. Olha lá na outra pra ti ver. ... Na 5 é ondulatório.
18. E_6 : Ah é, tá errado.
19. E_5 : Onde? Na 5?
20. E_6 : É. É corpuscular.
21. E_5 : Não é isso. Se tu tem a figura [padrão de interferência] é ondulatório. Daí o
22. fóton é onda. Se não tem é partícula.
23. E_6 : Ahn, tá.
24. E_5 : Tem que ver o que vai ser detectado antes. Daí tu sabe se é onda ou partícula.
25. E_6 : Tá, já saquei.
26. E_5 : Agora tem que ver a distinguibilidade. ... É 1. (...) Aqui diz que significa que tem
27. total informação disponível.
28. E_6 : Informação sobre o quê?
29. E_5 : A trajetória. (...) Vai pelo [braço] A e chega no D_2 . Quem vai pelo [braço] B chega
30. no D_1 .
31. E_6 : Hum:.
32. E_5 : 100% informação.

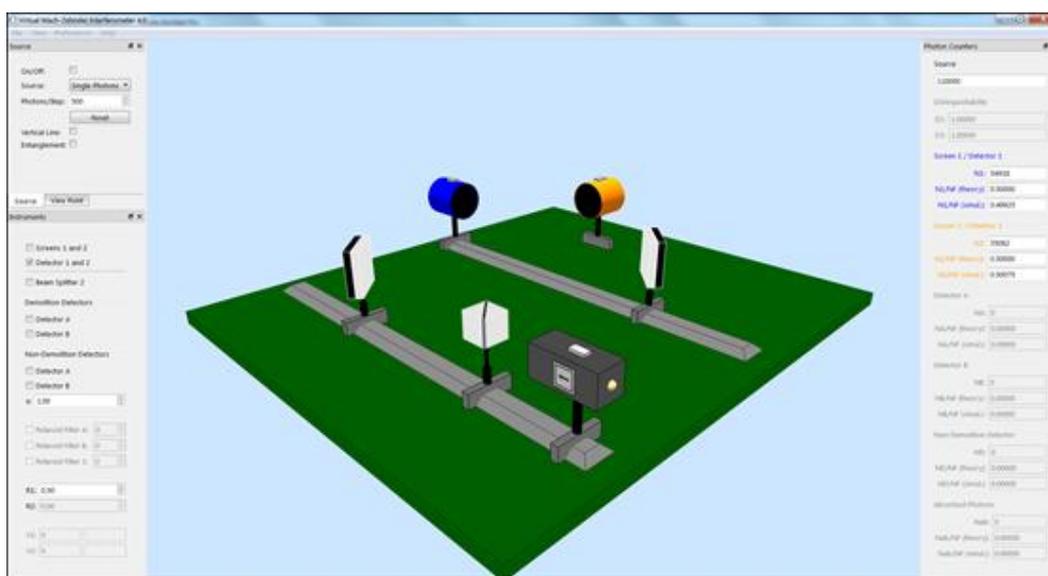


Figura 6: Retirando-se o segundo divisor de feixe evidencia-se o caráter corpuscular do objeto quântico, tendo aproximadamente 50 por cento de fótons acusados nos detectores 1 (azul) e 2 (laranja).

$R_1(1 - R_2)$] no detector ou anteparo 1 e $\mathcal{D}_2 = |R_1R_2 - (1 - R_1)(1 - R_2)|/[R_1R_2 + (1 - R_1)(1 - R_2)]$ no detector ou anteparo 2. Pode-se mostrar que a probabilidade máxima de ter sucesso em acertar o caminho no interferômetro associado ao fóton que produziu um sinal no detector ou uma marca no anteparo é $P_S = (1 + \mathcal{D}_i)/2$, sendo \mathcal{D}_i a distinguibilidade no correspondente detector ou anteparo i ($i = 1, 2$) (ENGLERT, 1996). É importante salientar que $0 \leq \mathcal{D}_i \leq 1$. Nota-se que o caso em que o segundo divisor de feixe é retirado corresponde a $R_2 = 0$. Pressupõe-se também que não foi introduzida diferença de fase adicional entre os dois feixes.

Nota-se que o estudante E_5 conduz o diálogo assumindo o papel de parceiro “mais capaz”, consolidando-se como tal desde os primeiros enunciados sem que se estabeleça uma tensão entre ambos, salvo quando E_6 manifesta “Isso eu também sei” (linha 14), se referindo ao caminho tomado pelos fótons. As suas explicações são imediatamente refutadas e este é levado a aceitar as explicações de E_5 .

No enunciado “Ahan. É um fóton né? Vai ser corpuscular” (linha 16) o estudante E_6 expressa concordância com o colega, retomando seu enunciado com a expressão ‘ahan’, entretanto, procurando compreender e complementar a caracterização do fenômeno observado utiliza erroneamente o termo ‘fóton’ para designar um fenômeno corpuscular.

Esse enunciado de E_6 expressa uma construção conceitual corpuscular para o fóton independente do contexto experimental. A identificação desta voz de cunho clássico permite dizer que o estudante E_6 ainda não se apropriou da natureza do fóton, aspecto central explorado no roteiro. Pela forma como E_5 faz uso dos recursos semióticos envolvidos, relacionando o padrão de interferência discutido no extrato anterior com a natureza do fóton (linhas 21 e 22), percebe-se que ele está bem mais amadurecido no domínio desses recursos do que E_6 , o que o leva a ter mais desenvoltura em elaborar enunciados que possam guiar suas ações mediadas pelo *software*. Seu enunciado também induz a posição responsiva de E_6 no sentido de fazê-lo aceitar que a natureza ondulatória ou corpuscular do fóton depende do contexto experimental. Nota-se ainda que o fato de E_6 aceitar que o fenômeno é ondulatório (linha 23) não pôs fim à discussão.

Nesse extrato parece surgir um distanciamento entre E_5 e E_6 no que se refere ao grau de compreensão dos conceitos envolvidos. Enquanto E_5 mostra uma mudança discursiva significativa em relação ao extrato anterior, elaborando enunciados que buscam relacionar os conceitos e consegue aplicá-los a diferentes situações, como a caracterização do fenômeno e a associação entre distinguibilidade e o caminho dos fótons, E_6 , embora pareça estar compreendendo melhor a situação proposta, apenas acompanha o roteiro exploratório e manifesta concordância com as proposições do colega, o que é evidenciado pelos enunciados “Ahn, tá.” (linha 22) e “Tá, já saquei.” (linha 25). Ainda assim, ele tem papel importante na interação discursiva ao provocar postura responsiva em E_5 , o que exige que o último articule enunciados cada vez mais elaborados durante as tensões que surgem nesse extrato discursivo (por exemplo, nas linhas 16 a 18 e 20 a 25). Mesmo E_5 atuando como parceiro “mais capaz”, o parceiro “menos capaz” E_6 tem importância fundamental na negociação de significados.

Contexto situacional IV

Após substituírem os detectores novamente por anteparos, os estudantes foram orientados a alterar o valor do coeficiente de reflexão do primeiro divisor de feixe para $R_1 = 0,8$, mantendo o do segundo em $R_2 = 0,5$. A figura 7 ilustra o que era mostrado na tela do computador. Ao variar R_1 de 0,5 para 0,8 a distinguibilidade deixa de ser nula e passa a ser 0,6 nos dois detectores, pois em média mais fótons serão refletidos em BS_1 do que transmitidos, ou seja, pode-se associar o caminho B a mais fótons do que o caminho A. Em outras palavras, o caminho associado ao fóton pode ser mais

facilmente inferido se escolhermos B como palpite. Como prevê a complementaridade, isso diminui o contraste do padrão de interferência¹², como mostrado na figura 7, constituindo-se em um exemplo de situação intermediária (há algum conhecimento sobre o caminho associado ao fóton, que acarreta uma perda correspondente, mas não total, do contraste do padrão de interferência).

33. E₅: *Ele quer saber as implicações em termos de informação disponível. (...)*
34. *Antes a distinguibilidade deu 1. Agora é 0,6.*
35. E₆: *Quer dizer que eu acerto o caminho de 60% dos fótons.*
36. E₅: *Não é isso. Não é probabilidade. Tem que olhar para a distinguibilidade.*
37. E₆: *Mas a teoria não é probabilística?*
38. E₅: *Não, não é isso. A teoria é probabilística, mas aqui não é isso que tá falando.*
39. E₆: *A distinguibilidade tem a ver com a informação, com o caminho. Eu sei o caminho*
40. *de 60% das partículas.*
41. E₅: *Lembra que antes falava em informação disponível? Eu não tenho*
42. *informação bem certa sobre a trajetória, só parcial.*
43. E₆: *Mesmo assim não concordo com isso. Pra mim, se a informação é parcial*
44. *quer dizer que eu não acerto o caminho de todas as partículas.*
45. E₅: *(...) Diminuiu a visibilidade. Foi de 1 pra 0,8.*
46. E₆: *Tá mais borrada a figura. E o que isto tem a ver com o caminho?*
47. E₅: *Mais informação disponível quer dizer mais distinguibilidade e, por isso, o*
48. *padrão sai borrado, com menos visibilidade.*
49. E₆: *Hum::, agora tá fazendo sentido.*
50. E₅: *A tua medida causa uma alteração no fóton.*

¹²O contraste, ou visibilidade, do padrão de interferência fornece uma quantificação do grau de caráter ondulatório do objeto quântico. O cálculo das intensidades normalizadas em cada anteparo [ver referências da nota 9] permite mostrar que no contexto do IVMZ as visibilidades em cada anteparo são dadas por $\mathcal{V}_1 = 2\sqrt{R_1R_2(1-R_1)(1-R_2)}/[R_2(1-R_1) + R_1(1-R_2)]$ e $\mathcal{V}_2 = 2\sqrt{R_1R_2(1-R_1)(1-R_2)}/[R_1R_2 + (1-R_1)(1-R_2)]$. Assim como a distinguibilidade, $0 \leq \mathcal{V}_i \leq 1$. A relação matemática que expressa a complementaridade entre os caracteres ondulatório e corpuscular do objeto quântico no IVMZ é $\mathcal{V}_i^2 + \mathcal{D}_i^2 = 1$, para ambos os anteparos ($i = 1, 2$). Assim, quando há certeza sobre o caminho, a distinguibilidade é 1 e a visibilidade é nula (ausência total de interferência, ou seja, caráter corpuscular). Situação complementar a essa, seria quando não há nenhuma informação disponível sobre o caminho (distinguibilidade nula), o que acarreta visibilidade máxima igual a 1 (caráter ondulatório). Situações intermediárias ocorrem quando os valores de visibilidade e distinguibilidade são menores que a unidade, obedecendo a relação $\mathcal{V}_i^2 + \mathcal{D}_i^2 = 1$ (ENGLERT, 1996). Nesse caso, há informação parcial sobre o caminho e padrão de interferência com visibilidade reduzida (caráter ondulatório e corpuscular aparecem simultaneamente, o que generaliza a concepção de Bohr da complementaridade entre os caracteres corpuscular e ondulatório, que não previa as situações intermediárias aqui citadas). Em geral, um aumento na distinguibilidade leva a uma diminuição correspondente na visibilidade do padrão de interferência e vice-versa. Estes parâmetros foram introduzidos na versão mais atual do IMZ.

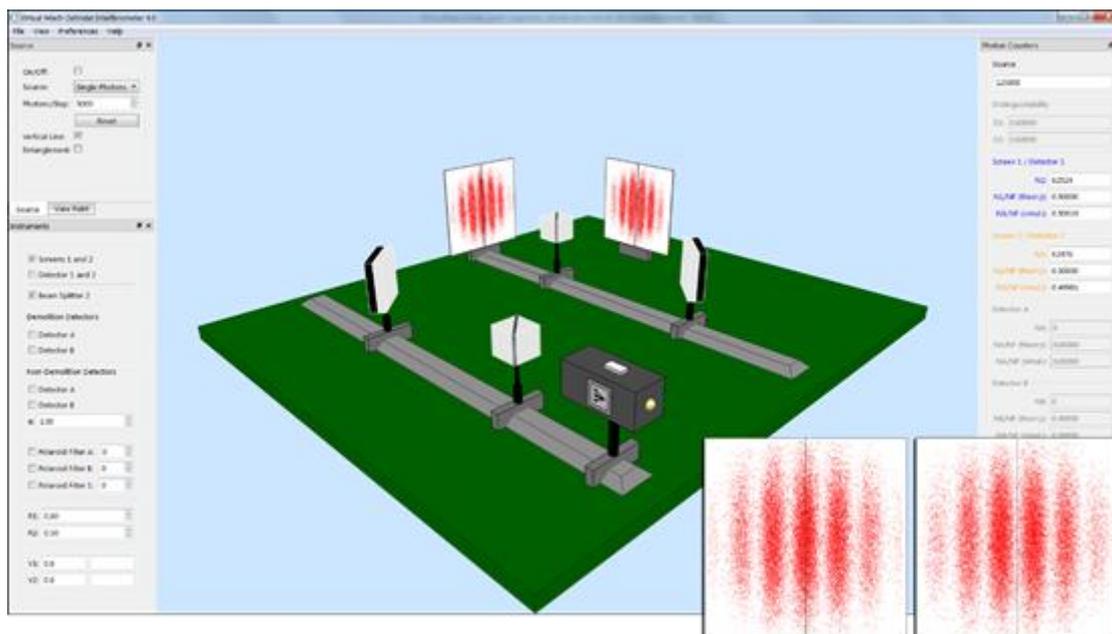


Figura 7: Padrões obtidos com os divisores de feixe desbalanceados, sendo $R_1 = 0,8$ e $R_2 = 0,5$.

A estrutura do diálogo manteve-se praticamente a mesma, com os dois estudantes participando das discussões, entretanto, o estudante E_6 demonstra maior maturidade do que antes, não apenas concordando com os enunciados do colega, mas propondo novos questionamentos.

No enunciado “Quer dizer que eu acerto o caminho de 60% dos fótons.” (linha 35), apesar de estar equivocado¹³, é possível perceber que está em curso uma construção de significados, pelo estabelecimento de relações entre conceitos como distinguibilidade e probabilidade de emitir um palpite correto sobre o caminho no interferômetro associado ao fóton que produziu uma dada marca em um dos anteparos (ver, por exemplo, as linhas 43 e 44).

No entanto, o estudante E_6 parece apoiar uma voz que encara a FQ como um mero jogo de probabilidades (linha 37), fato talvez influenciado por vozes presentes em livros didáticos que introduzem muito superficialmente a FQ, demonstrando que o estudante ainda não está maduro a ponto de compreender o fenômeno da interferência quântica. Nos seus enunciados, como na linha 35 (já citado) e em “A distinguibilidade tem a ver com a informação, com o caminho. Eu sei o caminho de 60% das partículas.” (linhas 39-40) este estudante parece estar convicto de que está correto.

O processo está ocorrendo dentro da ZDP, visto que E_6 consegue elaborar argumentos ao longo da interação discursiva com E_5 , mediada pelo *software*, apoiando-se nos enunciados do último e retomando o debate no enunciado “Mesmo assim não

¹³ O correto não é 0,6 (ou 60 por cento dos fótons). Como já citado, a probabilidade máxima de ter sucesso em acertar o caminho no interferômetro associado a um fóton incidente é $P_s = (1 + \mathcal{D}_i)/2$ (ENGLERT, 1996). Na situação proposta, $\mathcal{D}_i = 0,6$ (a distinguibilidade é a mesma em ambos os anteparos) teremos $P_s = 0,8$, ou seja, se o caminho B for escolhido como palpite, haverá cerca de 80 por cento de acertos.

concordo com isso. Pra mim, se a informação é parcial quer dizer que eu não acerto o caminho de todas as partículas.” (linhas 43-44).

Apesar da imprecisão cometida ao afirmar que poderia dar um palpite correto para cerca de 60 por cento dos fótons que incidem em cada anteparo, a afirmação de que não é possível associar com certeza o caminho B a todos os fótons é correta. Interessante ainda é que ele se refere aos fótons como partículas (linhas 39 e 44), não considerando que o caráter do fóton depende da interpretação adotada (tem caráter dual segundo a interpretação de Copenhagen, uma interpretação dualista). No contexto situacional 3, E₆ pareceu perceber esse caráter dual, com a ajuda de E₅. Nas linhas 41 a 49 nota-se como se dá o dialogismo entre os enunciados: E₆ novamente provoca posturas responsivas de E₅, cujos enunciados influem fortemente no discurso de E₆, no sentido de fazê-lo entender a situação física relativa à complementaridade entre distinguibilidade (uma medida do grau do caráter corpuscular do objeto quântico) e da visibilidade (uma medida do grau do caráter ondulatório do objeto quântico) do padrão de interferência, evidenciando seu papel de parceiro “mais capaz”. Essa cadeia dialógica de enunciados mostra a negociação de significados levando E₆ finalmente dizer “Hum::, agora tá fazendo sentido” (linha 49).

Assim, percebe-se que a interação entre os dois possibilita uma mudança discursiva em E₆ no sentido de estabelecer mais relações entre os conceitos físicos envolvidos, aos poucos compreendendo melhor a situação física. Ao mesmo tempo, E₅ é constantemente exigido no sentido de elaborar mais seus argumentos nas respostas aos questionamentos de seu colega. O estudante E₆ provoca atitudes responsivas em E₅ que o levam a proferir enunciados cada vez mais elaborados. É uma “disputa” em que parceiro “mais capaz” e “menos capaz” parecem sair ganhando.

Contexto situacional V

Ao final do roteiro exploratório os estudantes exploraram mais a relação entre a informação disponível sobre o caminho dos fótons e a visibilidade dos padrões nos anteparos, desta vez, com $R_1 = R_2 = 0,10$, conforme ilustrado na figura 8. Nesse caso, a distinguibilidade é nula para o anteparo 1 (ou seja, a visibilidade nesse anteparo é máxima e igual a 1) e igual a 0,97561 no anteparo 2 (a visibilidade nesse anteparo é $V_2 = \sqrt{1 - D_2^2} = 0,219512$). Nesse caso, pode-se dizer que os fótons que incidem no anteparo 1 têm comportamento totalmente ondulatório (grau 1). Quanto ao anteparo 2, os fótons que nele incidem têm comportamento com grau aproximadamente 0,98 corpuscular e 0,22 ondulatório.

51. E₅: *É aquele esquema de novo. Corpuscular aqui e ondulatório no [anteparo 1] D₁.*
52. E₆: *Aqui também vale aquele negócio da distinguibilidade?*
53. E₅: *Todos eles. Distinguibilidade zero no [anteparo 1] D₁ e quase 1 no 2.*
54. E₆: *A visibilidade tá invertida. 1 no [anteparo 1] D₁ e só 0,21 no 2.*
55. E₅: *É. Tá ao contrário.*
56. E₆: *Quanto maior a distinguibilidade, menos visível.*
57. E₅: *Isso. E a maioria passa pelo caminho A.*
58. E₆: *E como que eu calculo essa probabilidade?*
59. E₅: *É só olhar aqui óh. Quer dizer que só 10 por cento dos fótons são refletidos para o*
60. *caminho B.*

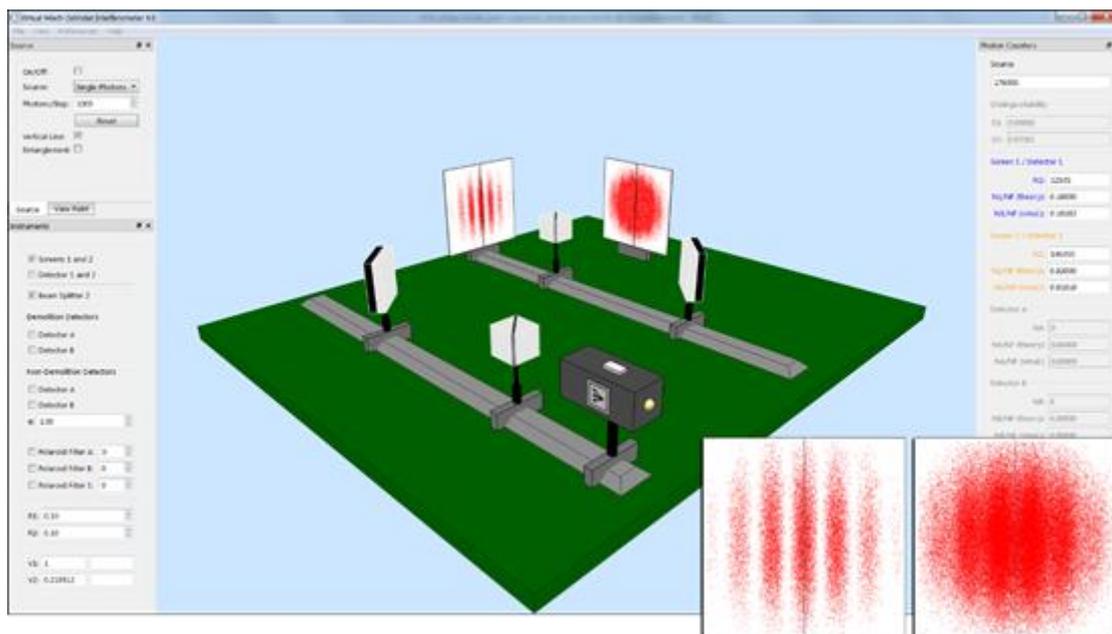


Figura 8: Fenômeno intermediário obtido com $R_1 = R_2 = 0,10$. Os padrões em cada anteparo revelam-se bem distintos: no anteparo 1 obtém-se um padrão de interferência com visibilidade máxima (ou seja, 1) e no anteparo 2 um padrão com visibilidade baixa (aproximadamente 0,22).

Esta última questão do roteiro exploratório, assim como a questão anterior, procurou instigar os estudantes a elaborarem estratégias discursivas que levassem a argumentos para explicar os resultados contraintuitivos visualizados no IVMZ, de modo que estes tivessem que recorrer à complementaridade onda-partícula para construir uma explicação. Embora a compreensão deste princípio não seja trivial, o problema apresentado procura explorar novamente a noção de informação disponível sobre os fótons.

O estudante E_6 demonstra por meio do enunciado “Aqui também vale aquele negócio da distinguibilidade?” (linha 52) que passa a incorporar a voz do colega (linhas 47-48, contexto situacional 4) no seu discurso. Ou seja, a mediação com o *software* aliada à interação discursiva com E_5 está possibilitando a organização de sua ação durante a atividade. Isso pode ser percebido também no enunciado “A visibilidade tá invertida. 1 no D_1 e só 0,21 no 2.” (linha 54), no qual o conceito de visibilidade aparece incorporado no discurso de E_6 . Além disso, ao complementar sua proposição afirmando que “Quanto maior a distinguibilidade, menos visível.” (linha 56) este estudante, mesmo sem a mesma profundidade do colega, se apropria de um enunciado anterior (linhas 47-48), interpretando-o e incorporando nele a sua voz (no caso, uma contrapalavra).

A posição de parceiro mais capaz desempenhado por E_5 é reforçado pela sua participação no discurso, orientando a discussão e reelaborando os seus enunciados como uma postura responsiva aos enunciados de E_6 . Ao se posicionar positivamente em relação aos enunciados do colega, por exemplo, “É. Tá ao contrário” (linha 56) e “Isso” (linha 57), E_6 se sente encorajado e convidado a participar do debate, o que potencializa a negociação de significados, fazendo com que ambos evidenciem discursivamente estarem paulatinamente ganhando domínio dos conceitos físicos

envolvidos (relação entre visibilidade e distinguibilidade, relação desses dois conceitos com o caráter respectivamente ondulatório e corpuscular do objeto quântico, etc.). Como já citado, E_6 , como parceiro 'menos capaz', tem papel fundamental na discussão ao induzir E_5 a reelaborar seus enunciados.

Ao final do debate entre estes estudantes ainda percebe-se que a noção de probabilidade é algo presente e importante para E_6 . Embora os cálculos de probabilidade sejam importantes, por exemplo, para estimar o número de detecções nos anteparos ou para avaliar as chances de acerto quando se tenta inferir o caminho de um dado fóton, a interferência quântica não pode ser reduzida a um simples jogo probabilístico que permita estimar o número de fótons que incide em cada anteparo decorrente do número de fótons refletido ou transmitido por um divisor de feixe. A explicação da formação do padrão de interferência, fenômeno previsto pelo formalismo da FQ, requer a adoção de uma interpretação que conecte o formalismo com o que é observado. A complementaridade é muito bem sucedida em prover essa conexão. É provável que, para o estudante E_6 , a complementaridade onda-partícula também passe a uma estratégia discursiva utilizada para estabelecer relações mais sólidas entre os conceitos físicos trabalhados (assim como a já utilizada teoria centrada em probabilidades), num processo de diversificação de uso de ferramentas culturais.

Conclusão

As análises dos extratos apresentadas neste trabalho evidenciam que o estudante E_5 assumiu a posição de parceiro mais capaz nas interações discursivas analisadas, principalmente após o contexto situacional 3. O *software*, como ferramenta mediacional, foi essencial para que os estudantes elaborassem estratégias discursivas nas quais foram evidenciadas tensões típicas de uma rica negociação de significados (por exemplo, nas linhas 16 a 23 ou 35 a 44), envolvendo disputas que levavam ambos a enriquecer seus argumentos, o que acarretou uma reelaboração discursiva nos dois estudantes.

Deslocando o foco da análise das interações discursivas da estrutura dos enunciados para o parceiro "menos capaz" (E_6), percebe-se que a análise de seus enunciados traz elementos interessantes que mostram a postura e compreensão responsiva tanto por parte de E_5 quanto em E_6 .

Em alguns enunciados do estudante E_6 (linhas 15, 19 e 28) pode-se ver que o mesmo também contribui para a organização tanto das ações da dupla quanto do pensamento do colega, mas o que chama atenção são os enunciados das linhas 37 e 43-44. Estes enunciados provocam uma rica negociação de significados, evidenciando o que o estudante E_6 está percebendo na simulação e exigem que E_5 reelabore seus argumentos para convencer o colega. Essa compreensão ativamente responsiva que ambos evidenciam em determinadas passagens ao longo dos extratos provavelmente deu suporte para que ambos os estudantes tenham demonstrado evolução para uma maior maturidade discursiva no processo.

Estes estudantes conseguiram estabelecer relações entre as quantidades distinguibilidade e visibilidade, estabelecendo também relações entre estas e a complementaridade (caracteres ondulatório e corpuscular do fóton), fazendo uso do *software* como ferramenta mediadora. Obviamente não é correto depositar somente

no IVMZ o mérito pela negociação de significados que culminou na mudança discursiva em ambos, visto que não faz sentido pensar o *software* isoladamente. O *software* e os roteiros exploratórios foram pensados no sentido de propiciar situações didáticas que possibilitassem essa rica negociação de significados e que possibilitassem o professor (parceiro mais capaz) perceber até que ponto os alunos conseguem realizar as tarefas sozinhos. A partir dessas situações, estudos futuros podem ser propostos para que outras situações didáticas e estratégias sejam concebidas para potencializar processos que ocorram na ZDP dos alunos.

Referências

- ASPECT, A. Prefácio. One century of quantum revolutions. In: SCARANI, V. **Quantum Physics, a first encounter: interference, entanglement & reality**. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- AULETTA, G.; FORTUNATO, M.; PARISI, G. **Quantum Mechanics**. New York: Cambridge University Press, 2009.
- BAKHTIN, M. M. **Estética da criação verbal**. 2. ed. Tradução de Maria Ermantina Galvão G. Pereira. São Paulo: Martins Fontes, 1997.
- BOHR, N. The quantum postulate and the recent development of atomic theory. **Nature**, v. 121, n. 3050, p.580–590, Apr. 1928.
- _____. Causality and Complementarity. **Philosophy of Science**, v. 4, n. 3, p.289-298, July1937.
- _____. On the Notions of Causality and Complementarity. **Dialectica**, v. 2, n. 3-4, p. 312-319, Nov. 1948.
- DIRAC, P. A. M. **The principles of Quantum Mechanics**. 4th rev.Oxford: Clarendon Press, 1958.
- 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, 9., 2012. Caxias do Sul, 2012. **Atas...** 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: 14 jan. 2014.
- 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.; BERGOU, J. A. Quantitative quantum erasure. **Optics Communications**, v. 179, n. 1–6, p.337-355, May2000.
- FAGUNDES, M. B. **Ensinando a dualidade onda-partícula sob uma nova óptica**. 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- FU, D. Vygotsky and Marxism. **Education and Culture**, v. 14, n. 1, p.10-17, spring1997.

- GEE, J. P.; GREEN, J. L. Discourse analysis, learning, and social practice: a methodological study. **Review of Research in Education**, v. 23, n. 1, p.119-169, Jan. 1998.
- GRECA, I.; FREIRE JR, O. Ênfase conceitual e interpretações no ensino da Mecânica Quântica. In: FREIRE JR., O.; PESSOA JR., O.; BROMBERG, J. L. (Eds.). **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais**. Campina Grande: EDUEPB, 2011. p.359-376.
- _____. Meeting the Challenge: Quantum Physics in Introductory Physics Courses. In: MATTHEWS, M. R. (Org.). **International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching**. 1 ed. Dordrecht: Springer, 2014. p.183-209.
- 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. G. **The quantum challenge: modern research on the foundations of Quantum Mechanics**. Sudbury: Jones and Bartlett, 2006.
- HAMILTON, M. W. Phase shifts in multilayer dielectric beam splitters. **American Journal of Physics**, v. 68, n. 2, p.186-191, Feb. 2000.
- 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.
- JAEGER, G.; SHIMONY, A.; VAIDMAN, L. Two interferometric complementarities. **Physical Review A**, v. 51, n. 1, p.54-67, Jan. 1995.
- KOZULIN, A. **Vygotsky's psychology: a biography of ideas**. Cambridge: Harvard University Press, 1999.
- KOZULIN, A.; GINDIS, B.; AGEYEV, V. S. et al. (Eds.) **Vygotsky's educational theory in cultural context**. New York: Cambridge University Press, 2003.
- LI, L.; LIU, N.-L.; YU, S. Duality relations in a two-path interferometer with an asymmetric beam splitter. **Physical Review A**, v. 85, n. 5, p. 1-4, Apr. 2012.
- 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.
- MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. Dificuldades dos professores em introduzir a física moderna no ensino médio: a necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos. In: NARDI, R. (Ed.). **Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores**. São Paulo: UNESP, 2009a. p. 145-159.
- _____. 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, set./dez. 2009b.
- 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.
- MUYNCK, W. M. **Foundations of quantum mechanics, an empiricist approach**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004.

OSTERMANN, F. **Tópicos de Física Contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de Física**. 1999. 433 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999a.

_____. Um texto para professores do Ensino Médio sobre partículas elementares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 21, n. 3, p.415-436, set. 1999b.

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, set./dez. 1999.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D. et al. 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, set./dez. 2009. Disponível em:<http://www.saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2012.

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.; 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. Investigando a aprendizagem de professores de Física acerca do fenômeno da interferência quântica. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 1, p.35-54, jan./abr. 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, maio/ago. 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, jan./abr. 2005.

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.

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, maio/ago. 2009a. Disponível em:<http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART1_Vol8_N2.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2012.

_____. 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.

_____. 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, abr./jun. 2012.

PEREIRA, A. P.; PESSOA JR., O.; CAVALCANTI, C. J. H. et al. 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.

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**. São Paulo: Livraria da Física, 2003. v. 1.

_____. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2006. v. 2.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, p.7-34, jan./abr. 1999.

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, maio/ago. 2009.

RIO, P. D.; 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. p.276-303.

SCHLOSSHAUER, M.; KOFLER, J.; ZEILINGER, A. A snapshot of foundational attitudes toward Quantum Mechanics. **Studies in history and philosophy of science part B: studies in history and philosophy of modern physics**, v. 44, n. 3, p.222-230, Aug. 2013.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 9, n. 3, p.209-214, set./dez. 1992.

_____. **Perspectivas para a Inserção da Física Moderna na Escola Média**. 1994. 241 p. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

VALADARES, E. D. C.; MOREIRA, A. M. Ensinando Física Moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 15, n. 2, p.121-135, maio/ago. 1998.

VOLOCHINOV, V. N. **Discurso na vida e na arte**: sobre a poética sociológica. Tradução de Carlos Alberto Faraco e Cristovão Tezza. New York: Academic Press, 1926.

VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente**. 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

_____. **Pensamento e linguagem**. 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

WERTSCH, J. V. **Voces de la mente**: Un enfoque sociocultural para el estudio de la Acción Mediada. Tradução de Adriana Silvestri. Madrid: Visor Distribuciones, 1993.

WICKMAN, P.-O.; ÖSTMAN, L. Learning as discourse change: A sociocultural mechanism. **Science Education**, v. 86, n. 5, p.601-623, Sept. 2002.

WOOTTERS, W.; ZUREK, W. 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.

ZEILINGER, A. General properties of lossless beam splitters in interferometry. **American Journal of Physics**, v. 49, n. 9, p.882-883, Sept. 1981.

Submetido em 09/04/2014, aceito para publicação em 28/07/2015.