

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENSINO DE FÍSICA**

**FUNDAMENTOS DE FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES:
UMA ANÁLISE DE INTERAÇÕES DISCURSIVAS EM ATIVIDADES CENTRADAS
NO USO DE UM INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ALEXSANDRO PEREIRA DE PEREIRA

**PORTO ALEGRE
2008**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENSINO DE FÍSICA**

**FUNDAMENTOS DE FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES:
UMA ANÁLISE DE INTERAÇÕES DISCURSIVAS EM ATIVIDADES CENTRADAS
NO USO DE UM INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**

ALEXSANDRO PEREIRA DE PEREIRA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação da profa. Fernanda Ostermann e co-orientação de Trieste S. F. Ricci, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

**PORTO ALEGRE
2008**

ALEXSANDRO PEREIRA DE PEREIRA

**FUNDAMENTOS DE FÍSICA QUÂNTICA NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES:
UMA ANÁLISE DE INTERAÇÕES DISCURSIVAS EM ATIVIDADES CENTRADAS
NO USO DE UM INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação da profa. Fernanda Ostermann e co-orientação de Trieste S. F. Ricci, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em:

Profa. Fernanda Ostermann
Doutora em Física, IF-UFRGS

Prof. Osvaldo Pessoa Júnior,
Doutor em História e Filosofia da Ciência, FFLCH-USP

Profa. Naira Maria Balzaretto,
Doutora Física, IF-UFRGS

Profa. Márcia Russmann Gallas
Doutora em Física, IF-UFRGS

Dedico este trabalho...

Ao meu pai, pelo carinho, dedicação e esforço em proporcionar, mediante inúmeros sacrifícios, educação formal aos seus filhos.

AGRADECIMENTOS

À profa. Fernanda Ostermann, minha orientadora, pela confiança depositada em mim ao acreditar no meu trabalho e incentivar meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao prof. Trieste Ricci, meu co-orientador, por suas valiosas colocações e sugestões que ajudaram a enriquecer o presente trabalho.

Ao prof. Cláudio Cavalcanti, colaborador da presente pesquisa, pela amizade e apoio, sem os quais esse estudo não seria possível.

Aos meus amigos, colegas de mestrado, pela convivência prazerosa e por suas contribuições acadêmicas e pessoais.

À minha namorada, companheira e amiga, pelo carinho, pela força e incentivo e por compartilhar comigo todos os seus sonhos.

RESUMO

Neste trabalho apresentamos uma investigação sobre o ensino de física quântica na formação inicial de professores. Essa pesquisa foi desenvolvida junto a uma disciplina da sétima etapa do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, durante o segundo semestre de 2007, através de uma atividade de ensino centrada na exploração de um *software* que simula o interferômetro de Mach-Zehnder. Inspirados nos trabalhos de Müller e Wiesner (2002) e Pessoa Jr. (2005), utilizamos o conceito de dualidade onda-partícula como o eixo central das discussões em sala de aula. O objetivo desse estudo consiste em analisar as tensões nos enunciados de estudantes, à luz do referencial sociocultural, e avaliar em que medida os enunciados dos estudantes se articulam à internalização de conceitos de física quântica no uso de instrumentos semióticos. Os resultados mostraram que as ações mediadas pelo uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder, como ferramenta cultural, auxiliaram os processos de compreensão, por parte dos alunos, viabilizando a negociação de significados em sala de aula que são aceitos e compartilhados pela comunidade científica.

Palavras-chave: análise do discurso, formação de professores, física quântica, interferômetro virtual de Mach-Zehnder .

ABSTRACT

In this paper, we present a research of quantum physics teaching in the context of a teachers preparation course. This investigation has been developed in a seventh level discipline of a Bachelor Degree Course in Physics Education, in the Federal University of Rio Grande do Sul, during the second semester of 2006, through a didactical activity based on the use of a computer program that simulate the Mach-Zehnder interferometer. Inspired by Müller and Wiesner (2002) and Pessoa Jr. (2005), we used the concept of wave-particle duality as the central aspect of discussions in the classroom. The aim of the present study was to analyze the student's utterances, in the light of sociocultural theories, and to investigate how the speech of the students articulates it self to the internalization of quantum physics concepts, in the use of semiotics instruments. The results showed that the actions mediated by the use of virtual Mach-Zehnder interferometer, as a cultural tool, supported the comprehending process in students, feasing the negotiation of meanings that are accepted and shared in scientific community.

Key-words: teacher's preparation, quantum physics, virtual Mach-Zehnder interferometer, discursive analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemática do interferômetro de Mach-Zehnder.....	14
Figura 2. Vista superior dos caminhos dos feixes de <i>laser</i>	72
Figura 3. IMZ operando sem o segundo espelho semi-refletor.....	73
Figura 4. Testando a polarização do feixe de <i>laser</i>	75
Figura 5. Pequenos <i>bugs</i> de programação nos polaróides 2 e 3.....	77
Figura 6. Interferência em regime clássico.....	78
Figura 7. Verificando a indivisibilidade dos fótons.....	79
Figura 8. Interferência quântica com detectores.....	80
Figura 9. Filtros polaróides em oposição angular.....	89
Figura 10. Polarização quântica.....	92
Figura 11. Recuperação do padrão de anéis.....	93
Figura 12. Interferência quântica com anteparos.....	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	UM ESTUDO NA LICENCIATURA EM FÍSICA DA UFRGS.....	10
1.2	POR QUE A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA?.....	11
1.3	POR QUE O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER?.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	METODOLOGIA EMPREGADA NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.1	Propostas testadas em sala de aula	18
2.1.2	Levantamento de concepções acerca de tópicos de FMC	24
2.1.3	Bibliografias de consulta para professores	30
2.1.4	Análise de publicações relacionadas ao ensino de FMC	43
2.2	SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA	44
3	REFERENCIAL TEÓRICO	46
3.1	A TEORIA DA MEDIAÇÃO DE L. S. VYGOTSKY.....	46
3.1.1	O método dialético	46
3.1.2	A importância da fala	47
3.1.3	O signo	48
3.1.4	Relação entre instrumentos e signos	49
3.1.5	Zona de desenvolvimento proximal	50
3.2	A FILOSOFIA SOCIOLINGÜÍSTICA DE M. M. BAKHTIN.....	52
3.2.1	O signo ideológico.....	52
3.2.2	Dialogicidade ou pluralidade de vozes.....	53
3.2.3	Os diversos significados da palavra.....	54
3.2.4	O enunciado.....	55
3.2.5	Análise do discurso.....	56
3.3	UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE.....	58
3.4	SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO.....	60
4	METODOLOGIA DE PESQUISA	61
4.1	ASPETOS GERAIS.....	61

4.2	CONCEPÇÕES RELATIVAS À DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.....	63
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES MEDIADAS PELO IMZ VIRTUAL.....	64
5	RESULTADOS.....	66
5.1	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO INSTRUMENTO.....	66
5.1.1	Efeito fotoelétrico.....	66
5.1.2	Experimento de dupla fenda.....	67
5.1.3	Interferômetro de Mach-Zehnder.....	68
5.1.4	Resultados do teste.....	69
5.2	RESULTADOS DA ANÁLISE DO DISCURSO.....	70
5.2.1	Episódios da dupla A_1 e A_2.....	71
5.2.2	Episódios da dupla A_3 e A_4.....	85
5.2.3	Episódios da dupla A_5 e A_6.....	95
5.2.4	Episódios do grupo A_7, A_8 e A_9.....	103
5.2.5	Síntese dos resultados da análise do discurso.....	111
6	CONCLUSÃO.....	114
	REFERÊNCIAS.....	116
	APÊNDICES.....	127
	A – teste de concepções relativas à dualidade onda-partícula.....	127
	B – roteiro para a exploração do IMZ virtual.....	134
	C – avaliação referente às atividades com o IMZ virtual.....	137

1 INTRODUÇÃO

1.1 UM ESTUDO NA LICENCIATURA EM FÍSICA DA UFRGS

O ensino de física moderna e contemporânea (FMC), em geral, e o ensino de Física Quântica (FQ), em particular, têm sido tema de vários estudos publicados nas principais revistas especializadas em pesquisa em educação em ciências. Esses trabalhos têm apresentado, entre outras propostas, estratégias didáticas inovadoras elaboradas tanto para o nível médio e universitário, bem como para o nível de pós-graduação.

Em uma revisão bibliográfica recente sobre o ensino de FMC¹, no entanto, foi possível identificar apenas quatro trabalhos envolvendo professores em formação (KALKANIS *et al.*, 2003; OSTERMANN e MOREIRA, 2004; OSTERMANN e RICCI, 2004; OSTERMANN e RICCI, 2005). Esse resultado aponta para a escassez de estudos relativos ao ensino de FQ na formação de professores, processo de fundamental importância para a construção de estratégias capazes de promover mudanças significativas na educação básica brasileira. Possíveis transposições didáticas dos fundamentos da Física Quântica para o ensino médio dependem, fortemente, de uma sólida formação conceitual por parte dos professores de física (OSTERMANN e PRADO, 2005).

No intuito de promover novos estudos na formação inicial de professores, apresentamos uma investigação sobre o ensino de FQ dentro de uma perspectiva sócio-cultural. Essa pesquisa foi desenvolvida junto a uma disciplina da sétima etapa do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul durante o segundo semestre de 2007. O estudo trata de uma análise dos enunciados de estudantes de física, futuros professores, em interação discursiva, a partir da exploração de um *software* que simula uma bancada virtual do interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ).

Inspirados nos trabalhos de Müller e Wiesner (2002) e Pessoa Jr. (2005), utilizamos o conceito de dualidade onda-partícula como o eixo central das

¹ Artigo submetido à revista *Investigações em Ensino de Ciências*.

discussões em sala de aula, no contexto das atividades com o IMZ virtual, enfatizando as diferentes interpretações da FQ. O objetivo desse estudo consiste basicamente em analisar as tensões nos enunciados dos alunos e avaliar em que medida o uso da linguagem e dos recursos semióticos disponíveis possibilitam a construção de significados que sejam socialmente compartilhados pela comunidade científica. Os diálogos de cada dupla, durante a exploração do *software*, foram registrados em áudio e os discursos dos alunos foram analisados à luz do referencial sócio-cultural, segundo alguns elementos da teoria de Bakhtin (2006), do ponto de vista metodológico.

1.2 POR QUE A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA?

A dualidade onda-partícula é, segundo Richard Feynman (FEYNMAN *et al.*, 1965; p. 1-1): a phenomenon which is impossible, 'absolutely' impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the 'only' mystery.

Existem muitos aspectos do mundo microscópico que podem ser considerados como essenciais à FQ: a presença de quantidades discretas (quantum de energia) ou processos descontínuos; o caráter probabilístico da teoria quântica; o princípio da incerteza, que proíbe a posição ou o *momentum* de uma partícula de serem simultaneamente determinados com total precisão; a impossibilidade de separar o observador do objeto observado; a superposição de estados, presente no famoso paradoxo do gato de Schrödinger; a não-localidade, expressa pela desigualdade de Bell. Qualquer uma dessas peculiaridades pode ser considerada como sendo a mais fundamental. Entretanto, como todos esses aspectos estão fortemente vinculados à dualidade onda-partícula, a assumimos, em nossa abordagem, como sendo a essência da FQ (PESSOA Jr., 2005, FEYNMAN *et al.*, 1965).

As partículas clássicas podem ser pensadas como sendo pequenas esferas que se movem no espaço. Para cada instante de tempo, essas pequenas esferas ocupam uma posição precisa no espaço e possuem uma velocidade instantânea bem determinada, descrevendo uma trajetória bem definida. As ondas clássicas, por

outro lado, são perturbações que se propagam em um meio, como as ondas planas na superfície de um lago. Longe de serem bem localizadas ou descreverem trajetórias bem definidas, as ondas são espalhadas no espaço e podem exibir alguns comportamentos tipicamente ondulatórios como o fenômeno de interferência. Assumir que um objeto é ao mesmo tempo onda e partícula é uma contradição lógica, pois isto implicaria afirmar que algo é bem localizado no espaço e espalhado ao mesmo tempo, e que segue uma trajetória bem definida no espaço e não segue. A teoria quântica precisa conciliar comportamento de onda e partícula sem sustentar essa contradição.

Se acompanhássemos a formação do padrão de interferência numa tela fosforescente, no experimento de dupla fenda, observaríamos, para um feixe de baixa intensidade, pontos aparecendo um após o outro. É importante ressaltar que a formação desse padrão de interferência, ponto a ponto, ocorre mesmo quando a fonte emite um único fóton de cada vez (regime monofotônico). Segundo Pessoa Jr. (2005), a versão fraca da dualidade onda-partícula pode ser enunciada da seguinte forma (PESSOA Jr. 2005, p. 3):

Para qualquer objeto microscópico, pode-se realizar um experimento tipicamente ondulatório (como um de interferência), mas a detecção sempre se dá através de uma troca pontual de um pacote mínimo de energia.

É importante notar que esse enunciado não afirma que os fótons ou os elétrons são sempre pontuais ou bem localizados; apenas afirma que, quando detectados, eles aparecem de maneira pontual. O enunciado também não afirma que fótons e elétrons sempre se comportam como ondas, mas sim que eles podem exibir interferência.

Apresentamos a seguir, de maneira simplificada, quatro visões filosóficas discutidas por Pessoa Jr. (2005) para interpretar a versão fraca da dualidade onda partícula. A *interpretação ondulatória* afirma que, antes da detecção, os objetos quânticos se propagam como ondas, mas, durante a detecção, eles se tornam mais ou menos localizados, comportando-se como uma partícula (colapso da onda). Não há mais contradição, pois num instante temos uma onda espalhada e no outro uma partícula. A *interpretação corpuscular* afirma que os objetos quânticos são partículas e que não há nenhuma onda associada. O padrão de interferência deve ser entendido a partir da interação dos fótons com o anteparo que contém as duas

fendas. A *interpretação dualista realista* afirma que o objeto se divide em duas partes: uma partícula com uma trajetória bem definida (porém desconhecida) e uma onda associada. A probabilidade de encontrar a partícula numa certa região depende da amplitude da onda associada de maneira que os locais onde há interferência destrutiva não há partícula. A *interpretação da complementaridade* afirma que nesse experimento em questão o fenômeno é ondulatório e não corpuscular, pois não podemos inferir a trajetória descrita pelo fóton.

Muitos dos mistérios quânticos, tais como o princípio da incerteza e o efeito túnel, são fenômenos descritos pela física clássica ondulatória que passam a ser fenômenos quânticos quando reduzimos a intensidade dos feixes de onda. Segundo Pessoa Jr., o regime quântico é a Física das Ondas para baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer (2005, p. 6).

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

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

Esta regra representa o postulado de Max Born proposto em 1926.

1.3 POR QUE O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER?

A partir dos trabalhos de Müller & Wiesner (2002) e da abordagem conceitual da FQ proposta por Pessoa Jr. (2005), implementamos, em uma turma de

licenciandos em Física, uma atividade virtual centrada na exploração de um *software* que simula o interferômetro de Mach-Zehnder (OSTERMANN *et al.*, 2006).

O IMZ é um aparato experimental capaz de demonstrar o fenômeno da interferência entre ondas. Similar ao experimento de fenda dupla, porém mais simples, o IMZ foi desenvolvido independentemente por Ludwig Mach e Ludwig Zehnder em torno de 1892. O arranjo experimental do IMZ está esquematizado na figura 1.

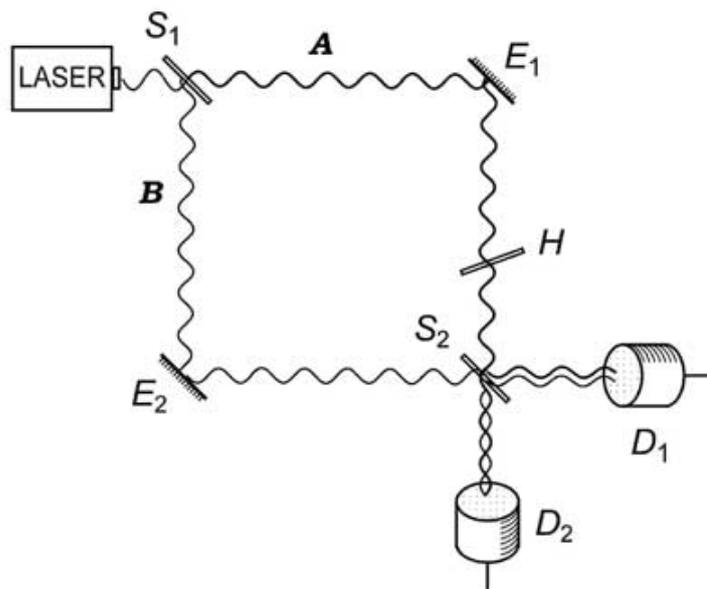


Figura 1. Esquematização do interferômetro de Mach-Zehnder (PESSOA JR, 2006, p. 10).

Considere um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa, incidente sobre um espelho semi-refletor, S_1 , que divide o feixe em uma componente transmitida (caminho A) e outra componente refletida (caminho B), ambas de mesma intensidade e coerentes. Após serem refletidos pelos espelhos E_1 e E_2 , ambas as componentes recombinam-se num espelho semi-refletor S_2 antes de atingirem os detectores D_1 e D_2 .

Sabendo-se que as componentes refletidas sofrem um deslocamento de fase de $\pi/2$, correspondente a uma diferença de caminho óptico de $1/4$ de comprimento de onda (DEGIORGIO, 1980), pode-se verificar que as componentes do feixe que incidem em D_1 estão em fase (interferência construtiva), enquanto que as componentes do feixe que incidem em D_2 estão defasados em $\lambda/2$ (interferência destrutiva). Têm-se, portanto, 100% do feixe detectado em D_1 e 0% do feixe

detectado em D_2 . Se operarmos o IMZ em regime quântico, isto é, se reduzirmos a intensidade da luz a tal ponto que apenas um único fóton seja emitido pela fonte de cada vez (regime monofotônico), observaremos o mesmo resultado obtido para o caso clássico: 100% dos fótons detectados em D_1 e 0% dos fótons detectados em D_2 .

Representando uma releitura mais moderna do experimento de dupla fenda, o IMZ tornou-se um dos experimentos mais cruciais para a compreensão dos fundamentos da FQ ao provocar naturalmente reflexões sobre o problema conceitual da escolha dos caminhos pelo fóton (RICCI *et al.*, 2007). Esse aparato tem sido extensivamente usado em trabalhos de computação quântica e criptografia quântica (CABRAL *et al.*, 2004 *apud* RICCI *et al.*, 2007). Seu uso em simulação virtual, no presente trabalho, justifica-se plenamente pela falta de recursos nos laboratórios didáticos que possibilitem a preparação de estados monofotônicos, tecnologia alcançada somente a partir dos anos 80 em laboratórios avançados de física (OSTERMANN *et al.*, 2006).

O *software* utilizado no presente estudo, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em ensino de física da UFRGS, é uma versão mais completa do IMZ virtual desenvolvido por Müller e Wiesner (2002) e está disponível em três diferentes idiomas (português, inglês e espanhol). Seu uso em estudos no Mestrado Profissional em Ensino de Física no Instituto de Física da UFRGS, tem se mostrado extremamente válido tanto em termos de motivação para estudos posteriores quanto em relação a uma visão mais conceitual da FQ (OSTERMANN *et al.*, 2006).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Tendo em vista o tema do presente estudo, apresentamos a seguir uma análise da produção acadêmica recente sobre o ensino de FMC (PEREIRA e OSTERMANN, 2008)². Essa revisão é uma versão ampliada de um trabalho apresentado sob a forma de comunicação oral no 6º Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (PEREIRA e OSTERMANN, 2007). A pesquisa envolveu a consulta a artigos das principais revistas da área de ensino de ciências do Brasil e do exterior, publicados no período de 2001 a 2006, e abrangeu trabalhos sobre o ensino de FMC tanto em nível médio e universitário, como em cursos de formação de professores.

A partir dos trabalhos consultados, foi possível identificar as seguintes categorias: (a) Propostas testadas em sala de aula que apresentam resultados de aprendizagem; (b) Levantamento de concepções acerca de tópicos de FMC; (c) Bibliografia de consulta para professores; (d) Análise de publicações relacionadas ao ensino de FMC.

A primeira categoria refere-se à implementação em sala de aula de estratégias didáticas inovadoras para o ensino de FMC, tanto em nível médio e universitário como em cursos de formação continuada de professores, envolvendo atualização curricular, inovações didáticas e inclusão de novas tecnologias. A segunda categoria engloba os trabalhos que fizeram um levantamento de concepções, atitudes, idéias prévias, modelos mentais, invariantes operatórios ou do perfil conceitual de professores e alunos acerca de tópicos de FMC. A terceira categoria trata das bibliografias de consulta direcionadas aos professores de física, tanto de nível médio como de nível universitário, incluindo textos didáticos, recursos didáticos, propostas de unidades didáticas, divulgação científica e debates filosóficos. Os artigos presentes nessa categoria não apresentam resultados de pesquisa. A última categoria refere-se aos trabalhos que se dedicaram à análise de periódicos, livros didáticos e currículos escolares em busca de um panorama sobre o ensino de FMC.

² Artigo submetido à revista *Investigações em Ensino de Ciências*.

É importante frisar que a categorização descrita acima não é a única possível e que alguns dos trabalhos revisados encontram-se citados em mais de uma categoria. Não é nosso objetivo fazer qualquer análise crítica a respeito do material consultado. As diferentes posições tomadas pelos autores consultados acerca do ensino de FMC não são necessariamente compartilhadas pelos autores do presente estudo.

2.1 METODOLOGIA EMPREGADA NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a análise da produção acadêmica recente relativa ao ensino de FMC, foi utilizada a seguinte metodologia: i) o levantamento do universo completo de trabalhos sobre o ensino de FMC posteriores à revisão de Ostermann e Moreira (2000); ii) definição dos temas presentes nos artigos revisados; e iii) categorização dos temas.

O universo de trabalhos é constituído do total de artigos publicados nas principais revistas de ensino de ciências do Brasil (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 e Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências) e do exterior (American Journal of Physics, Enseñanza de la Ciencia; International Journal of Science Education; Journal of Research on Science Education, Physics Education; Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencias, Science Education e Science & Education), no período de 2001 a 2006. O levantamento desse universo teve início em janeiro de 2007 e resultou em uma amostra de 108 artigos.

A definição dos temas (levantamento de concepções de estudantes, estratégias didáticas inovadoras, inclusão de novas tecnologias no ensino de FMC, etc.) foi feita a partir da análise do conteúdo presente nos trabalhos e procurou-se, desde o início, verificar os objetivos dos autores e enquadrar a diversidade dos temas abordados em categorias que fossem mais abrangentes.

As categorias utilizadas para análise, por sua vez, foram elaboradas com base na classificação proposta por Ostermann e Moreira (2000). A partir da análise do conteúdo dos artigos, no entanto, fez-se necessário adaptar algumas das

categorias (b e c) de modo a contemplar todos os trabalhos recentes. Esse procedimento possibilitou, entre outras mudanças, a elaboração do item (d), mencionado na seção anterior.

2.1.1 Propostas testadas em sala de aula

Os trabalhos classificados nessa categoria pertencem a dois grandes grupos: implementações de inovações didáticas no ensino médio; implementações de inovações didáticas em nível de graduação e pós-graduação. A partir da revisão que apresentamos no presente texto, foi possível identificar cinco linhas de pesquisa: (a) mudança de enfoque no ensino de FQ introdutórios em cursos de graduação; (b) FMC na formação inicial e continuada de professores de física; (c) Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e interdisciplinaridade; (d) avaliação de novos cursos, materiais de apoio e recursos computacionais; e (e) estratégias inovadoras para a inserção de FMC no ensino médio.

Santiago *et al.* (2001) elaboraram e avaliaram um curso introdutório de física de plasma para nível universitário. A metodologia adotada baseou-se em aulas expositivas e atividades experimentais, ministradas por quatro professores. Os temas abordados foram: (a) caracterização e produção de plasma; (b) funções de distribuição de energia; (c) parâmetros de plasma; (d) descarga gasosa em gases; (e) lei de Child-Langmuir; (f) lei de Paschen; (g) teoria de órbita; (h) magnetohidrodinâmica (MHD); (i) ondas de plasma; (j) descrição cinética de plasma e modelo híbrido de plasma limitado. Os resultados da avaliação do curso mostraram-se satisfatórios.

Carstens-Wickham (2001) desenvolveu, em colaboração com dois colegas da *Southern Illinois University Edwardsville*, um curso interdisciplinar que possibilitou a integração de dois campos distintos: ciências naturais e ciências sociais. O curso, intitulado “a era atômica”, examina a inter-relação entre eventos culturais, sociais, históricos e políticos e o desenvolvimento da física na Europa e nos Estados Unidos na primeira metade do século XX. O autor desenvolveu os temas (refugiados europeus, ciência americana e bomba atômica) a partir de uma combinação especial de física, sociologia e língua alemã. As atividades de sala de aula consistem de

leituras acompanhadas de apresentações no *PowerPoint*, vídeo clipes, filmes, slides, materiais de áudio e alguns trabalhos de grupo. Os resultados da avaliação do curso realizado pelos estudantes mostraram-se satisfatórios.

Greca *et al.* (2001) desenvolveram e avaliaram uma unidade didática organizada para introduzir a FQ a estudantes de graduação. Rompendo com a abordagem semiclássica centrada na seqüência histórica, a proposta didática desenvolveu os conteúdos numa seqüência em forma de espiral. Os resultados do teste de agrupamentos hierárquicos, além de outras técnicas de análise, mostraram que a abordagem fenomenológico-conceitual foi bem sucedida.

Em outro estudo, Greca e Herscovitz (2002) implementaram em três turmas de engenharia a mesma unidade didática introdutória com um enfoque fenomenológico-conceitual. Enfatizando as características quânticas dos sistemas, as autoras abordaram os seguintes temas: (a) computação quântica; (b) efeito túnel; (c) auto-interferência de uma partícula; (d) saltos quânticos; e (d) o paradoxo do gato de Schrödinger. Os resultados da implementação desta estratégia didática mostraram que mais da metade dos estudantes conseguiu uma compreensão razoável dos conceitos discutidos.

Em um estudo de caso na Alemanha, Budde *et al.* (2002 b) acompanharam o processo de aprendizagem de dois estudantes expostos ao modelo atômico alternativo '*Electronium*'. Segundo esse modelo, o elétron é constituído de uma substância distribuída ao redor do núcleo cuja densidade é descrita pela equação de Schrödinger. Os resultados do pós-teste e a análise de uma entrevista realizada dois anos após a intervenção com o modelo *Electronium* mostraram que os estudantes desenvolveram a concepção atômica na qual os elétrons não se movem quando o átomo está em um estado estacionário.

Em um estudo com futuros professores, Kalkanis *et al.* (2002) concluíram que a instrução pré-universitária dos professores é responsável por causar a mistura das estruturas conceituais da física clássica e da FQ. Assumindo a suposição de que essas concepções alternativas formam um obstáculo epistemológico para a aquisição de conceitos de FQ, os autores elaboraram e avaliaram uma estratégia educacional que permitiu formar uma estrutura conceitual que inclui a física clássica e a FQ como dois sistemas conceituais totalmente independentes. A estratégia constituiu-se de cinco componentes: (a) investigação preliminar do conhecimento prévio dos estudantes; (b) associação da teoria com a fonte das concepções

alternativas – uma avaliação educacional dos conceitos pertencentes aos conteúdos; (c) a ferramenta instrucional; (d) o projeto instrucional; e (e) a avaliação e os processos de meta-cognição. Os resultados mostraram-se satisfatórios, segundo os autores.

Scherr *et al.* (2002) desenvolveram e avaliaram um material instrucional elaborado para promover a compreensão dos estudantes acerca do conceito de tempo na relatividade especial, da relatividade da simultaneidade e do papel do observador no referencial inercial adotado. Segundo os autores, os resultados do pré e pós-teste mostraram o efeito do currículo em ajudar os alunos a aprofundar no tema. As análises das entrevistas gravadas e das interações entre os alunos durante as atividades propostas ajudaram a ilustrar o intenso conflito cognitivo que os estudantes enfrentam quando confrontam suas crenças profundamente enraizadas sobre simultaneidade com os resultados da relatividade especial.

Muller e Wiesner (2002) implementaram um curso introdutório de FQ no contexto dos laboratórios virtuais. A proposta foi de mostrar desde o início aos estudantes, através do fenômeno de interferência quântica no experimento de dupla fenda e no interferômetro de Mach-Zehnder, o quanto os fenômenos quânticos diferem da nossa experiência clássica diária. Segundo os autores, os resultados da avaliação do curso mostraram que a maioria dos estudantes adquiriu concepções apropriadas da FQ e que muitas das concepções alternativas comumente encontradas nas instruções tradicionais foram evitadas.

Em outro estudo, Greca e Freire Jr. (2003) implementaram, em três grupos de estudantes de engenharia, a unidade didática com enfoque conceitual-fenomenológico. A estratégia didática dá mais ênfase às características dos sistemas quânticos (superposição de estados, princípio da incerteza, dualidade onda-partícula, distribuição de probabilidades e não-localidade) do que ao uso de analogias clássicas. Essa abordagem permitiu que os autores apresentassem a teoria associada a uma ortodoxa, mas realista, interpretação do conceito de estado quântico, considerado o conceito-chave da teoria quântica, representando a realidade física de um sistema independentemente dos processos de medida. Os resultados mostraram que, além de mais da metade dos estudantes atingir um entendimento das bases da teoria quântica para esse nível de instrução, 80% dos estudantes declararam ter gostado das aulas e se mostraram interessados em aprender mais sobre o assunto.

Yang (2003) examinou as preferências e a orientação cognitiva de estudantes do último ano do ensino médio de Taiwan frente aos conhecimentos científicos e sociais. O autor analisou os modos de raciocínio utilizados pelos estudantes quando se posicionam em relação a assuntos ambientais tais como o uso de energia nuclear. A análise estatística e as entrevistas mostraram que o desempenho dos estudantes em ciências é um bom prognóstico de suas preferências em relação aos conhecimentos científicos ou sociais, e que os modos de raciocínio dos estudantes são consistentes com suas preferências. Os resultados da pesquisa mostraram que os estudantes sem preferência (neutros) dispunham de um modo de raciocínio mais integrador em relação aos demais.

Peduzzi (2004), ao trabalhar com alunos universitários, utilizou um material instrucional produzido a partir de notas de aula, à luz de referenciais epistemológicos. A proposta foi de aproximar a física da filosofia a partir das raízes históricas da física atômica na disciplina Estrutura da Matéria. Após uma sondagem exploratória, os alunos demonstraram bastante receptividade com o material. Os principais aspectos analisados foram: (a) a importância do papel do professor como facilitador da compreensão do texto; (b) as dificuldades inerentes aos conteúdos estudados; e (c) a falta de clareza de conteúdos específicos.

Paulo e Moreira (2004) implementaram uma unidade didática sobre FQ em turmas de primeiro e segundo anos do ensino médio em duas escolas da rede pública de ensino. As turmas de primeiro ano tiveram aulas sobre óptica ondulatória e sobre o experimento de dupla fenda antes da implementação da unidade didática. Os autores afirmam que os resultados da investigação parecem indicar que não houve dificuldades em aprender conceitos da teoria quântica que fossem maiores que as dificuldades de aprendizagem inerentes à física clássica e que o conhecimento prévio sobre ondulatória clássica, por parte dos alunos, não parece influenciar criticamente os resultados de aprendizagem.

Samagaia e Peduzzi (2004), preocupados em manter o estudante como centro das atividades em sala de aulas, implementaram, numa turma de 8º série do ensino fundamental, um módulo didático sobre FMC no contexto do Projeto Manhattan. Os autores utilizaram, como estratégia didática, uma técnica psicoterápica de RPG (*Role Playing Game*) e estruturaram uma história (supostamente fictícia) que reproduziu o quadro da 2ª Guerra Mundial. Os conteúdos contemplados ao longo da unidade didática foram: fissão nuclear; a

radiação; a pesquisa e o uso de armas químicas e biológicas; a energia. Os resultados da pesquisa mostram uma grande receptividade da proposta por parte dos estudantes, além de evidências de aprendizagem dos conteúdos envolvidos.

Trabalhando em colaboração com seis alunos da licenciatura do curso de física na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ostermann e Moreira (2004) implementaram uma unidade didática sobre supercondutividade em turmas de duas escolas de ensino médio através da disciplina de Estágio Supervisionado. Os autores buscaram estabelecer analogias com a física clássica à luz da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel. Os resultados da pesquisa mostraram-se satisfatórios tanto na preparação dos futuros professores, bem como em termos de aprendizagem dos alunos de nível médio.

Trabalhando com professores de física do ensino médio, Ostermann e Ricci (2004) implementaram uma unidade didática conceitual sobre FQ elaborada com base nos trabalhos de Müller e Wiesner (2002), Pessoa Jr (1997) e Ireson (2000). Os autores usaram como “porta de entrada ao mundo quântico” a óptica ondulatória e deram ênfase aos experimentos de interferência quântica a partir de dois *softwares* tipo “bancada virtual”. Esse estudo permitiu o levantamento de concepções errôneas dos professores acerca de conceitos de FMC e os resultados do pré e pós-testes indicaram a mudança dessas concepções. Em outra investigação (OSTERMANN e RICCI 2005), os autores apresentaram os resultados de um estudo envolvendo uma nova versão da unidade didática, com maior ênfase nos experimentos virtuais. Além dos roteiros exploratórios elaborados para as atividades com os *softwares*, foram utilizados como material de apoio o livro “Alice no país do quantum” de Gilmore e um texto produzido pelos autores. Os resultados dos pré e pós-testes mostraram mudanças nas concepções dos professores, principalmente às que se referem às diferenças entre os objetos clássicos e quânticos.

Em outro estudo, Greca e Herscovitz (2005) deram ênfase ao princípio da superposição de estados, tema pouco abordado nos cursos introdutórios de FQ tradicionais. Os resultados apresentados mostram que, apesar de manterem algumas concepções errôneas, os estudantes tiveram uma melhor compreensão da teoria quando comparados a outros que receberam instrução numa abordagem tradicional e a estudantes de física de semestres mais avançados que foram submetidos aos mesmos testes.

Köhnlein e Peduzzi (2005) implementaram em uma turma de ensino médio um módulo didático baseado em uma abordagem histórico-filosófica da relatividade restrita. A proposta foi organizada de acordo com os três momentos pedagógicos de Angotti & Delizoicov (apud KÖHNLEIN e PEDUZZI 2005). A problematização inicial consistiu no levantamento de concepções dos alunos acerca dos métodos de construção do conhecimento científico. A organização do conhecimento fundamentou-se a partir das discussões sobre a concepção empirista-indutivista e suas limitações. Finalmente, a aplicação do conhecimento teve como pano de fundo a mecânica clássica (transformações de Galileu), o eletromagnetismo (éter e as transformações de Lorentz) e a relatividade restrita, abordados numa perspectiva de ruptura entre paradigmas. Os resultados do trabalho mostraram mudanças significativas nas concepções de ciência vigentes.

Machado e Nardi (2006) avaliaram em um curso de extensão para alunos do terceiro ano do ensino médio um *software* educacional sobre temas de FMC. Trata-se de um hipertexto elaborado numa perspectiva ausubeliana que busca desenvolver os seguintes conceitos: (a) a equivalência entre massa e energia; (b) o caráter descontínuo da evolução do conhecimento e sua provisoriedade; (c) relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente; (d) o papel da ética na ciência. O *software* é constituído de seis módulos didáticos: visão geral (textos introdutórios sobre física clássica e FMC); a teoria da relatividade (postulados, dilatação do tempo e contração do espaço, momentum e energia relativística, teoria da relatividade geral); tecnologia e sociedade (textos sobre física nuclear, reatores e armas nucleares, acidentes radioativos); história da ciência (textos sobre o desenvolvimento histórico das teorias modernas, projeto Manhattan e bibliografia de A. Einstein); filosofia e ciência (metodologia dos programas de pesquisa, ciência e ética); fronteiras da ciência (textos sobre buracos negros e ondas gravitacionais). Os resultados da avaliação mostraram que o uso do computador foi fator de motivação, a variedade de recursos de mídia favoreceu a visualização e a interpretação dos fenômenos abordados e a estruturação do hipertexto com base em princípios ausubelianos foi um elemento facilitador da aprendizagem.

Kofoed (2006) apresentou outro exemplo de jogos de papéis (RPG – *Role Playing Game*) baseado num projeto educacional envolvendo o desenvolvimento e o uso das bombas lançadas sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki durante a segunda guerra mundial. Fundamentado nos trabalhos de Gräber *et al* (2001), o

projeto educacional *Dramatic Science Play* foi desenvolvido para escolas de ensino médio da Dinamarca. Após a implementação do programa em 12 turmas, o autor submeteu seus alunos a um questionário semi-aberto constituído de 56 questões. Os temas avaliados foram o jogo de papéis nas aulas de física, o interesse dos alunos em física e a ética na física. Os resultados mostram-se satisfatórios, segundo os autores.

Explorando a eficácia do uso da escrita como ferramenta de aprendizagem no ensino de ciências, Gunel *et al.* (2006) compararam o entendimento de estudantes sobre FQ ao usarem *multimodal representations* em dois diferentes formatos de escrita: formato de apresentação (PowerPoint) e formato de resumos (resumos de capítulos). Os autores utilizaram um pré e um pós-teste para comparar o desempenho de dois grupos através de duas unidades. Os conteúdos abordados foram o efeito fotoelétrico e o modelo atômico de Bohr. Os resultados mostram que, em ambas unidades, o grupo que utilizou o formato de apresentação teve uma pontuação significativamente melhor do que o grupo rival.

2.1.2 Levantamento de concepções acerca de tópicos de FMC

Os trabalhos classificados nessa categoria apresentam o levantamento de concepções alternativas, de atitudes, de idéias prévias, de modelos mentais, de invariantes operatórios e do perfil conceitual de professores e de alunos acerca de conteúdos de FMC.

Em um estudo envolvendo dois grupos de indivíduos recém saídos da escola (30 pessoas entre 18 e 24 anos de idade), Alsop (2001) procurou investigar as atitudes das pessoas que viveram e se educaram em regiões geográficas com nível de concentração de rádio na atmosfera maior do que a média. Utilizando a metodologia de entrevista-sobre-cenários, o autor abordou os seguintes temas: (a) a natureza e os efeitos gerais das fontes radioativas e radiação; (b) a natureza específica e feitos do gás rádio; e (c) os perigos associados com radioatividade e com o gás rádio. Os resultados da pesquisa mostraram que, embora poucas diferenças conceituais e emocionais tenham sido observadas entre os grupos, os participantes que viveram com níveis de concentração de rádio elevados

demonstraram maior conhecimento sobre as práticas diárias de viver sob crescente risco.

Em uma discussão sobre o uso de analogias no ensino de ciências, Taber (2001) alertou para dificuldades potenciais de se modelar o átomo no sistema solar. O autor defende que as diferenças entre os dois sistemas são tão importantes quanto as suas semelhanças. Além disso, algumas pesquisas (TABER, 1998; GILBERT e ZYLBERSZTAJN, 1985; WATTS e ZYLBERSZTAJN, 1981 apud TABER, 2001) apontaram para concepções errôneas de alguns alunos acerca das leis de Newton quando expressaram suas idéias sobre forças de interação entre as cargas no átomo e sobre as forças gravitacionais entre o Sol e os planetas. Alguns resultados sugerem que os alunos têm lançado mão de modelos atômicos para fazer inferências a respeito do sistema solar.

Scherr *et al.* (2001) investigaram a concepção de estudantes acerca do conceito de tempo na teoria da relatividade. Os resultados das atividades propostas pelos autores mostraram que estudantes de todos os níveis acadêmicos têm sérios problemas com a relatividade da simultaneidade e com o papel do observador num sistema de referência inercial. Segundo os autores, há evidências que sugerem que os estudantes constroem estruturas conceituais nas quais a simultaneidade absoluta e a simultaneidade relativa coexistam harmoniosamente. Os autores destacaram as seguintes concepções dos estudantes: (a) a crença de que eventos são simultâneos se o observador recebe os sinais de ambos eventos ao mesmo tempo; (b) a crença de que a simultaneidade é absoluta; (c) a crença de que cada observador constitui um sistema de referência distinto.

Greca e Herscovitz (2002) analisaram, à luz da teoria de Johnson-Laird, os modelos mentais utilizados pelos 69 alunos de uma turma de graduação durante a resolução de três problemas abertos envolvendo alguns conceitos fundamentais da teoria quântica (princípio da incerteza, densidade de probabilidade e superposição linear de estados). Apesar de 17 estudantes mostrarem evidência da construção de modelos adequados para abordagem de problemas de FQ, a maioria baseou-se nos modelos mentais clássicos ou “híbridos” para descrever o comportamento quântico dos sistemas microscópicos.

Montenegro e Pessoa Jr. (2002) investigaram as interpretações “privadas” que alunos de MQ desenvolveram sobre essa teoria. O instrumento utilizado pelos autores foi aplicado em cinco turmas de graduação e em três turmas de pós-

graduação e constitui-se de questões abertas e fechadas sobre: (a) o experimento de dupla fenda; (b) princípio da incerteza; (c) estado quântico; (d) retrodição; (e) postulado da projeção. Os resultados mostraram, entre outros aspectos, que as interpretações adotadas pelos alunos acerca da teoria quântica mudam conforme a situação-problema apresentada.

Olsen (2002) examinou como estudantes pré-universitários (18-19 anos de idade) da Noruega lidam com o conceito de dualidade onda-partícula. Os resultados de um teste (duas questões objetivas e uma questão aberta) aplicado a 236 estudantes recém formados em nível médio mostraram que, para a maioria dos indivíduos da amostra, elétrons são partículas enquanto que a luz apresenta natureza dual. As concepções mais freqüentes, segundo esse estudo, foram: (a) elétrons são partículas (27,9%); (b) elétrons são partículas, mas possuem algumas propriedades ondulatórias (22,0%); (c) luz são partículas que se movem em ondas (8,1%); (d) luz são ondas (6,7%); (e) elétrons são partículas que se movem em ondas (6,4%). Segundo o autor, 59,2% dos estudantes formulou uma dualidade muito vaga para luz (17,2% para elétrons).

Greca e Freire Jr. (2003) fizeram um levantamento de concepções de estudantes de física e engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul a respeito da natureza dos objetos quânticos. Segundo os autores, de uma amostra de 69 estudantes: (a) quinze estudantes interpretam os objetos quânticos como partículas materiais que carregam algumas propriedades como massa e que descrevem trajetórias bem definidas; (b) cinco estudantes entendem os elétrons e fótons como tendo propriedades justapostas de ondas e de partículas e que são vistos como sendo diferentes manifestações do mesmo conceito; (c) para três dos estudantes, os elétrons não podem ser caracterizados como partículas por haver uma incerteza em suas posições, uma vez que a probabilidade de encontrá-los é dada pela função de onda (não havendo o mesmo esclarecimento para fótons); (d) para dois dos estudantes, os fenômenos quânticos são basicamente fenômenos ondulatórios; (e) para um único aluno, os fenômenos quânticos são entendidos a partir do formalismo da FQ (o único a atribuir significados corretos para os conceitos da teoria). Não foi possível, segundo os autores, identificar as concepções de seis dos estudantes.

Pérez e Solbes (2003) fizeram uma análise crítica acerca da possibilidade de inserção de temas de relatividade no ensino médio. A investigação constitui-se de

três etapas: (a) análise dos livros didáticos de nível médio; (b) análise das respostas de um questionário aplicado a professores de ensino médio acerca de suas atitudes e de suas propostas de abordagem sobre o tema; e (c) análise das respostas de um questionário aplicado a alunos de nível médio acerca de suas concepções sobre conceitos clássicos relacionados à teoria da relatividade restrita (TRR). Segundo os autores, os livros de nível médio não apresentam adequadamente os conceitos de tempo e de espaço. Os resultados da pesquisa também mostraram que os professores não levam em conta resultados da investigação didática e que pouco se consolidam as novas concepções nos estudantes.

Após a implementação de uma unidade sobre FQ segundo a interpretação de Copenhague, Paulo e Moreira (2004), num estudo envolvendo cerca de 100 alunos de ensino médio, levantaram algumas concepções referentes aos conceitos de complementaridade e não-determinismo a partir de um pós-teste sobre o experimento imaginário do gato de Schrödinger. As categorias identificadas nesse estudo foram: soma das partes diferentes do todo (auto-interferência de aspectos antagônicos); superposição de estados (coexistência harmônica de opostos); interação sujeito-objeto (características dependentes do contexto); colapso da função de onda (a medida prepara o estado); incompreensibilidade (dificuldade inerente à teoria); separação do mundo clássico e quântico (limite de validade da teoria); clássico/ probabilístico (coexistência de probabilidades e não de estados); clássico/ livre-arbítrio (probabilidades determinadas pelas escolhas); clássico/ ignorância (incerteza relacionada à ignorância).

Num trabalho realizado com uma turma do curso de mestrado profissional, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ostermann e Ricci (2004) levantaram algumas concepções dos professores de física de ensino médio acerca da natureza dos objetos quânticos. Para a maioria dos professores da amostra (dezoito no total): falta clareza sobre os limites de validade da FQ e da física clássica; massa é uma propriedade exclusiva da física clássica; as leis de conservação de massa e momentum só se aplicam aos objetos clássicos; os objetos quânticos são necessariamente relativísticos; os objetos quânticos possuem necessariamente propriedades físicas discretas; a impossibilidade de se observar diretamente os objetos quânticos está associada à sua natureza probabilística; os fótons só existem nas transições atômicas.

Através de uma entrevista com professores de física de ensino médio na Argentina, Arriasecq e Greca (2004) fizeram um levantamento das principais dificuldades que os docentes enfrentam ao ensinar a teoria da relatividade restrita. O objetivo central da pesquisa foi investigar quais são os livros didáticos mais utilizados pelos professores na preparação de suas aulas, assim como os mais recomendados aos alunos. A análise da entrevista aponta para a falta de conhecimento prévio, por parte dos estudantes, acerca de alguns conceitos fundamentais de mecânica newtoniana tais como transformações de Galileu (41%) e sistema de referência (27%) como sendo o principal obstáculo para ensino da relatividade, segundo a avaliação dos professores. A pesquisa revelou também que a maioria dos docentes utiliza os livros didáticos como principal, se não único, recurso na preparação das aulas e que, em geral, esses mesmos livros são recomendados aos alunos.

Taber (2005) utilizou a Tipologia como um instrumento heurístico para diagnosticar as origens das dificuldades de estudantes (16-18 anos de idade) em aprender um tópico curricular problemático: o modelo orbital do átomo. Segundo o autor: (a) o desconhecimento sobre física clássica que prediz que átomos com elétrons “planetários” podem não ser estáveis pode impedir os estudantes de compreender porque a quantização de energia é introduzida; (b) estudantes que não sabem que a força centrípeta é necessária para manter uma órbita circular acabam esperando que os elétrons sejam atraídos para dentro do núcleo, mesmo no modelo planetário do átomo; (c) estudantes que não entendem a natureza do movimento circular vêem a inércia como razão suficiente para elétrons orbitarem em torno dos átomos; (d) estudantes que adotam o significado cotidiano de *spin* imaginam que os elétrons possuem essa propriedade por estarem continuamente girando; (e) os estudantes esperam que a energia absorvida da radiação seja distribuída pelos elétrons assim como o calor é distribuído pelas moléculas do material aquecido.

Ke *et al.* (2005) investigaram a evolução dos modelos mentais de estudantes sobre a estrutura atômica. Através de um questionário do tipo papel e lápis e de entrevistas envolvendo temas de FQ, os autores compararam os modelos de estudantes de diferentes níveis de instrução (graduandos, mestrados e doutorandos) com os três estágios do desenvolvimento histórico da FQ (velha FQ, transição para mecânica ondulatória e mecânica ondulatória probabilística). Os

resultados mostraram que uma porção substancial dos entrevistados (17 dos 28 estudantes) encaixa-se em mais de uma categoria.

Em um estudo realizado na Argentina, Arriassecq e Greca (2006) levantaram algumas concepções que estudantes de nível médio possuem acerca de conceitos fundamentais da física clássica considerados necessários para uma adequada conceitualização dos aspectos mais relevantes da teoria da relatividade restrita. Dentre os aspectos mais importantes investigados pelas autoras, destacam-se: (a) a simultaneidade; (b) sincronismo de relógios; (c) tempo; (d) espaço; (e) observador; (f) sistema de referência. A análise dos dados obtidos nesse estudo foi feita com base na teoria dos campos conceituais de Vergnaud e os resultados mostraram evidência de alguns teoremas-em-ação, tais como: o tempo é difícil de definir; o tempo é uma unidade; o tempo é absoluto; o tempo é relativo; representa-se o tempo com um relógio; o tempo é uma variável independente de um sistema de coordenadas; não se pode representar o tempo; não se pode viajar no tempo por questões tecnológicas; não é possível viajar no tempo fisicamente; não se pode representar o espaço; observador pode ser um indivíduo ou um instrumento que registre dados detalhadamente; dois eventos são simultâneos quando ocorrem ao mesmo tempo e no mesmo lugar; o mais importante no processo de medição é o instrumento; para resolver problemas de física não é necessário levar em conta o sistema de referência; os postulados são crenças que podem se converter em teorias científicas; as teorias científicas permitem explicar fenômenos.

Baseados na noção de perfil conceitual de Mortimer (1995), Karam *et al.* (2006) implementaram, em uma turma de primeiro ano do ensino médio, uma unidade didática que aborda tópicos da TRR logo após o estudo da cinemática. Os resultados do pré e pós-teste evidenciaram uma ampliação do perfil conceitual do tempo por partes dos estudantes. As concepções de tempo identificadas pelos autores, ao final da unidade, foram: tempo psicológico (realidade subjetiva); tempo cronológico (unidades quantificadas: relógio); tempo absoluto de Newton (independente de referencial); tempo discreto (quadros indivisíveis); tempo determinístico (destino); tempo e probabilidade (futuro incerto); tempo relativístico (relatividade restrita).

Rego e Peralta (2006) investigaram as concepções de estudantes portugueses de diferentes níveis de instrução acerca do conceito de radiação. Os autores aplicaram um instrumento de análise em uma amostra de 1246 estudantes.

O instrumento constitui-se de duas partes: questões de múltipla escolha; uma escala do tipo Likert. Esse instrumento possibilitou a avaliação do conhecimento da amostra sobre os diferentes tipos de radiações, fontes radioativas e os efeitos da radiação sobre os seres vivos. Os resultados mostraram que, apesar de a maioria dos alunos da amostra já ter ouvido falar sobre radiação, uma porcentagem significativa não tem conhecimento sobre os processos naturais de radiação, nem das diferenças entre os distintos tipos de radiação (ionizada e não-ionizada). Os autores afirmaram que, embora muitos estudantes reconheçam os raios-X como sendo um tipo de radiação, o mesmo não ocorre para a luz.

2.1.3 Bibliografias de consulta para professores

Nos trabalhos classificados nessa categoria, foi possível identificar cinco diferentes tipos de produção acadêmica: (a) textos didáticos sobre temas de FMC; (b) novos recursos didáticos para o ensino de FMC; (c) estratégias didáticas inovadoras; (d) divulgação científica; e (e) posicionamentos filosóficos sobre FQ.

Valadares e Moreira (1998)³ apresentaram um texto didático abordando analogias e sugestões conceituais e práticas para se introduzir tópicos de FMC no ensino médio. O texto abrange: efeito fotoelétrico; laser e aplicações – fibras ópticas e leitura de código de barras; radiação do corpo negro – experiência de absorção e emissão de radiação.

O trabalho de Ostermann e Cavalcanti (2001) consiste na apresentação um pôster sobre as interações fundamentais e as partículas elementares. Desenvolvido para facilitar a inserção desse tema no ensino médio, o pôster traz informação a respeito das quatro interações fundamentais da natureza (gravitacional, eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca), além das propriedades da matéria (cor, carga, massa), classificação das partículas elementares (quarks, léptons e partículas mediadoras) e combinações das mesmas (hádrons: bárions e mésons). O material didático descrito acima também apresenta o modelo atual do átomo, bem

³ Edição Especial do Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 21, 2004.

como alguns exemplos de leis de conservação como o decaimento beta e a aniquilação quark-antiquark.

Cavalcante *et al.* (2001) apresentaram duas atividades didáticas distintas envolvendo o ensino do efeito fotoelétrico: uma simulação computacional e um experimento prático com LED's (*Light Emitting Diode*). O objetivo é determinar experimentalmente um valor aproximado para a constante de Planck. Além de uma introdução conceitual e geral sobre a descoberta do efeito fotoelétrico, os autores propõem, ao final do texto, uma abordagem interdisciplinar entre professores de física, filosofia e matemática para discutir o comportamento dual da luz.

Cavalcante e Tavolaro (2001) desenvolveram uma oficina de física moderna que visa sua inserção no ensino médio. Utilizando experimentos de baixo custo e simulações computacionais, as autoras apresentam ao longo da oficina uma revisão sobre óptica ondulatória e ondas eletromagnéticas, além de atividades envolvendo o efeito fotoelétrico, a observação de espectros contínuos e discretos e a difração de elétrons.

Para abordar “a descoberta do núcleo”, tema geralmente tratado apenas na disciplina de química, Cavalcante *et al.* (2001) apresentaram um recurso computacional e um equipamento desenvolvido por Ferreira *et al* (*apud* CAVALCANTE *et al.* 2001). O objetivo foi simular o experimento de Geiger-Marsden e obter o espalhamento de Rutherford, desenvolvendo no aluno a capacidade de investigação científica.

Mackintosh (2001) apresentou a imagem pública da física nuclear, impreterivelmente associada à bomba e aos riscos ambientais referentes à geração de energia elétrica. Em defesa do estudo do núcleo atômico, o autor destaca entre outros aspectos: (a) a formação dos elementos dos quais tudo que vemos é feito; (b) os processos que geram a radiação solar (vital para a vida) e demais estrelas; (c) o fato de que pode servir de “palco” para um seleto grupo de fenômenos quânticos; (d) o fato de ser uma importante “janela” para o mundo microscópico das partículas fundamentais, (e) aplicação na área médica. Para corrigir essa imagem excessivamente negativa da física nuclear, membros da comunidade científica europeia vinculadas ao projeto PAN (*Public Awareness of Nuclear Science*) sugeriram algumas medidas, tais como turnês expositivas, um livro popular e uma página na web. Infelizmente, o projeto foi suspenso porque apenas dois institutos de pesquisa demonstraram interesse em participar.

Bergström *et al.* (2001) oportunizaram ao público geral de Estocolmo, Suécia, uma exposição teórica e experimental da dualidade onda-partícula e outros aspectos da FQ. A motivação para tal exposição, segundo os autores, foi a grande audiência da peça de teatro *Copenhagen*, em cartaz no *Royal Dramatic Theatre of Sweden*. A peça abordou a visita de Werner Heisenberg a Niels Bohr e os supostos diálogos sobre suas interpretações acerca do mundo microscópico e gerou grande repercussão entre o público leigo. Os temas abordados pelos autores foram: ondas mecânicas; experimentos com ondas estacionárias; luz como onda e partículas – dualidade onda-partícula; estudo do átomo; relação de incerteza de Heisenberg; experimentos de laboratório sobre a relação de incerteza; flutuações quânticas do vácuo.

Linton (2001) demonstrou que a equação para o efeito Doppler relativístico pode ser obtida a partir de uma abordagem corpuscular para o fóton. Utilizando as transformadas de Lorentz, o autor deduziu a velocidade v de uma partícula clássica e aplicou a relação entre o momentum e o comprimento de onda de De Broglie. Para o limite $v \rightarrow c$, o autor obteve a mesma equação para o efeito Doppler obtida para luz na abordagem ondulatória.

Dunne (2001) chamou a atenção para as regras de construção dos diagramas de Feynman. Segundo o autor, apesar de se tratar de um poderoso instrumento para representar e descrever as interações entre partículas subatômicas, um grande número de textos de livros didáticos, bem como instruções de professores referentes à física de partículas, não abordam de forma consistente a construção e o uso dos diagramas, apresentando-o como uma mera ilustração informal.

Berenguer e Selles (2001) propuseram, para o ensino de relatividade em nível médio, o resgate das idéias sobre espaço-tempo e representações geométricas introduzidas por Minkowski em 1907. Esta estratégia didática alternativa baseia-se em seis pontos distintos: (a) a crise da física clássica; (b) a relação entre os fenômenos eletromagnéticos e a relatividade galileana; (c) a invariância da velocidade da luz; (d) as características qualitativas dos diagramas de Minkowski; (e) a irrelevância do conceito de massa relativística; e (f) um vínculo claro entre relatividade restrita e geral.

Dias *et al.* (2002) elaboraram um laboratório virtual de física nuclear. Esse *software* desenvolvido pelos autores simula um detector de radiação tipo Geiger-Müller, três amostras radioativas e placas absorvedoras.

A partir de uma construção teórica comprometida com a epistemologia de Toulmin, Arriassecq e Greca (2002) propuseram alguns eixos para a análise de livros didáticos de ensino médio que abordam a TRR. Os aspectos destacados são: contextualização histórica da TRR; reflexão epistemológica referente a gênese da TRR; repercussão da TRR em diferentes âmbitos; discussões conceituais.

Abd-El-Khalick (2002) propôs uma atividade para ajudar os estudantes de ensino médio a desenvolver uma melhor compreensão sobre a natureza da ciência a partir do ensino do experimento de Rutherford e da estrutura atômica. A atividade consiste em uma espécie de caixa preta, feita com cartolina, bombardeada com bolas de ping-pong cujas trajetórias são observadas num anteparo. Pretende-se, a partir do experimento, analisar alguns aspectos da ciência, tais como: (a) a natureza observacional e inferencial do conhecimento científico; (b) a distinção entre observação e inferência; (c) a natureza dos modelos científicos; (d) o papel da criatividade e da imaginação nos modelos científicos gerados.

Pascolini e Pietroni (2002) implementaram um projeto de ensino de física de partículas baseado nos diagramas de Feynman. Abrindo mão do formalismo matemático, os autores desenvolveram um brinquedo com três elementos: elétrons, fótons e partículas mediadoras (vértices de interação). As demonstrações para públicos de nível médio têm possibilitado discussões de alguns conceitos do mundo das partículas elementares, tais como antimatéria, leis de conservação, partículas de criação e destruição e partículas reais e virtuais.

Budde *et al.* (2002 a) elaboraram, na Alemanha, um modelo atômico alternativo baseado na equação de Schrödinger e intitulado 'Electronium'. Desenvolvido para facilitar a aprendizagem de alunos acerca dos modelos atômicos quânticos, esse modelo alternativo apresenta o elétron como sendo constituído de uma substância (uma espécie de um líquido) distribuída ao redor do núcleo atômico. O quadrado do módulo da amplitude da função de onda, $|\psi|^2$, é interpretado como sendo proporcional a densidade de tal substância e, no estado fundamental, essa densidade decresce linearmente a partir do núcleo. No estado estacionário, a forma do Electronium é constante no tempo. Porém, na transição de um estado excitado para um estado mais baixo a distribuição de densidade da substância muda, causando uma emissão de radiação eletromagnética. Quando a posição do elétron é medida, a carga elétrica concentra-se em um ponto.

Dunne (2002) apresentou as origens do modelo de troca de píons para as forças nucleares. Ao longo dessa discussão, o autor descreveu os processos de interação via troca de partículas mediadoras e opôs-se à analogia da bola de basquete, reinterpretando as interações entre partículas à luz do modelo dos quarks-glúons para a estrutura dos núcleons.

Jones (2002) propôs uma maneira simples e prática de introduzir alguns conceitos de FQ tais como dualidade onda-partícula, a versão tempo-energia do princípio de incerteza de Heisenberg, partículas virtuais e o papel que elas desempenham na interação entre partículas subatômicas. Esse trabalho se baseou em experiências docentes passadas em que o autor abordou esses tópicos em nível introdutório para audiências variadas. Após várias tentativas, essa abordagem se mostrou mais bem sucedida por enfatizar que para medir a frequência de uma onda com melhor precisão, mais tempo é necessário.

Levrini (2002) apresentou uma análise das diferentes abordagens filosóficas da relatividade geral. Utilizando o conceito de espaço como critério cultural e educacional para a reorganização do debate sobre os fundamentos da teoria, o autor identificou três possíveis interpretações para seu formalismo que podem guiar professores universitários que desejam prover seus alunos com instrumentos para a leitura e a interpretação de diferentes livros sobre o tema.

Numa edição especial da revista *Science & Education* sobre Física Quântica, Bunge (2003 b) propôs três teses sobre a física do mundo microscópico. Segundo o autor: (a) a idéia de uma unidade mínima (quantum) não é peculiar à teoria da quântica; (b) as peculiaridades dos objetos descritos pela teoria são suas leis probabilísticas, suas propriedades espalhadas (tais como posição e energia), a associação de partículas espacialmente separadas e as propriedades físicas do vácuo; (c) a interpretação de Copenhague é falsa e deve ser substituída por uma interpretação realista. Bunge discutiu também a desigualdade de Heisenberg, o gato de Schrödinger e o paradoxo quântico de Zenão à luz de duas interpretações rivais e mostrou que os experimentos que violaram a desigualdade de Bell não refutam o realismo, mas o classicismo inerente à teoria das variáveis ocultas.

Na mesma edição da *Science & Education* mencionada anteriormente, Cordeiro (2003) apresentou sua contribuição para o debate sobre os aspectos conceituais e filosóficos da FQ. Em resposta ao ensaio de Mario Bunge, o autor apresentou uma reformulação de alguns tópicos abordados pelo mesmo tais como:

(a) o colapso da função de onda e a conservação de energia; (b) a interpretação de Copenhague; (c) o paradoxo do gato de Schrödinger; (d) o efeito Zenão quântico; (e) e o realismo da teoria quântica.

Ainda na referida edição especial, Cini (2003) discutiu as três principais teses propostas por Mario Bunge. O autor discordou da primeira tese defendida por Bunge, argumentando sobre a peculiar natureza dos quanta e apresentou sua distinta, mas não contrária, visão a respeito da peculiar natureza das propriedades dos objetos quânticos e da interpretação realista da teoria quântica.

No intuito de esclarecer e simplificar o ensino da FQ, Lévy-Leblond (2003) apresentou uma discussão conceitual sobre as entidades básicas da teoria. Utilizando-se do conceito de Quantões, proposto por Mario Bunge, o autor discutiu sobre a natureza dos objetos quânticos, sobre as propriedades quânticas e sobre o comportamento quântico coletivo.

Apesar de concordar com muitas das teses defendidas por Mario Bunge em seu referido ensaio, Pauri (2003) defendeu que a quantização da ação e a formulação da teoria quântica representam uma inovação na história do conhecimento. Segundo o autor, a vibração de uma corda é completamente definida no espaço e evolui no tempo de forma contínua de maneira que a quantização da frequência depende das características do sistema tais como comprimento da corda e sua densidade.

Fechando o debate sobre aspectos filosóficos da FQ, Bunge (2003 b) apresentou suas respostas aos comentadores de seu último ensaio. Revendo os pontos de maior desacordo do debate, o autor: (a) enfatizou a peculiaridade dos quantões, rejeitando a hipótese da novidade absoluta; (b) mostrou como a teoria quântica da medida falha em explicar como os instrumentos de medida funcionam; (c) defendeu que a cosmologia quântica, que afirma saber o vetor de estado do Universo, é, de longe, apenas uma fantasia.

Heathcote (2003) defendeu a idéia de que a teoria quântica apresenta significantes problemas para os filósofos, pois sustenta e é sustentada por um agrupamento de doutrinas filosóficas que seria rejeitada pela maioria dos trabalhos atuais no campo da filosofia. Segundo o autor, ter uma postura realista em relação à FQ é a única forma dela fazer sentido frente à dificuldade genuína do problema da medida.

Pospiech (2003) apresentou algumas sugestões para implementar aspectos filosóficos em cursos de mecânica quântica. Propondo um diálogo entre um filósofo da antiguidade, um filósofo do Iluminismo e um filósofo da FQ, o autor apresentou resultados da teoria usando como pano de fundo alguns termos filosóficos importantes. O autor discutiu, a partir do experimento EPR (POSPIECH, 2003), as seguintes questões: percepção e realidade; potencialidade e fatos reais; totalidade e isolamento; o corte de Heisenberg; objetos físicos e espaço.

Freire Jr. (2003) apresentou um ensaio sobre as controvérsias das implicações epistemológicas e ontológicas da FQ. O autor discutiu algumas observações preliminares sobre como os físicos gerenciam os aspectos científicos, filosóficos e até políticos das controvérsias, no intuito de estabelecer o *modus operandi* de seus trabalhos.

Mermin (2003) apresentou uma estratégia didática elaborada para ensinar FQ a estudantes matematicamente alfabetizados que não possuam conhecimentos em física. A proposta, destinada a matemáticos e cientistas da computação, é abordar apenas os tópicos da FQ necessários para que os estudantes possam compreender e desenvolver algoritmos em computação quântica e teoria quântica da informação. Os tópicos sugeridos pelo autor são: (a) ciência da computação e mecânica quântica; (b) bits clássicos (Cbits) e operadores nos Cbits; (c) bits quânticos (Qbits) e operadores nos Qbits; (d) a medida; (e) observações cautelosas e reflexões quase-filosóficas.

Black e Gutenkunst (2003) apresentaram uma introdução ao tema “ondas gravitacionais”. Preocupados com o ensino desse novo tema em nível de graduação e pós-graduação, os autores discutem o funcionamento de interferômetros de ondas gravitacionais (detectores). Os autores abordam os seguintes tópicos: (a) ondas gravitacionais; (b) interferômetro de Michelson como detector de ondas gravitacionais; (c) transformando um detector de Michelson em um detector de ondas gravitacionais.

Através de uma abordagem acessível a estudantes pré-universitários, Toal (2003) apresentou uma simples descrição matemática da gravação e reprodução de um holograma. Utilizando uma representação de frente de onda, o autor discutiu os resultados obtidos para amplitude e fase holográficas. Segundo o autor, essa abordagem pode prever resultados importantes que são obtidos por experimentos holográficos mais antigos e sofisticados.

Harshman (2003) apresentou uma discussão sobre a incerteza da massa de partículas instáveis. Segundo o autor, essa largura das partículas instáveis pode ser teoricamente relacionada com a meia-vida pela relação de Weisskopf-Wigner (HARSHMAN, 2003). O autor apresentou várias representações gráficas da massa e do espectro da largura de partículas subatômica instáveis, argumentando ser poderosa ferramenta para introduzir os estudantes ao zoológico das partículas elementares. O autor abordou os seguintes tópicos: (a) partículas instáveis; (b) espectro de massa; e (c) largura do espectro.

Ehrlich (2003) apresentou uma discussão sobre partículas mais rápidas que a luz (*tachyons*). Por se tratar de um tema excitante para os alunos, devido à sua natureza especulativa e controversa, o autor apresentou uma revisão sobre o tema e sobre o papel que ele desempenha na relatividade especial. Após examinar a possibilidade de um dos neutrinos ser um *tachyon*, o autor descreve algumas demonstrações úteis para o ensino de velocidades superiores à da luz em cursos introdutórios de física.

Arruda e Toginho Filho (2004) desenvolveram um laboratório caseiro de física moderna utilizando materiais de baixo custo. Entre as montagens descritas no texto, destacam-se os experimentos com lâmpada comercial de vapor de mercúrio, tais como o espectro de mercúrio e o efeito fotoelétrico.

Scott (2004) apresentou uma planilha da Microsoft Excel que simula um detector de partículas. Segundo o autor, trata-se de um modelo tridimensional que pode ser girado e a trajetória de partículas pode ser destacada. A planilha modela as potencialidades de um detector de partículas real e pode servir como instrumento educacional.

Barnes *et al.* (2004) apresentaram o pêndulo como um veículo para discutir a transição da física clássica para a física quântica. Os autores fizeram uma revisão de alguns fatos pertinentes da história do desenvolvimento das idéias quânticas, analisando a transição do pensamento clássico para o pensamento quântico. Após apresentar algumas características do oscilador harmônico quântico com uma acessível ilustração, mediante controvérsias filosóficas, os autores exploraram alguns desafios e estratégias para o ensino de FQ tanto de nível universitário, bem como de nível médio.

Waltham (2004) apresentou uma discussão sobre as oscilações dos neutrinos. Utilizando-se de argumentos, figuras e analogias, ao invés de matemática,

o autor abordou os seguintes tópicos: (a) quarks e léptons; (b) a idéia de Pontecorvo; (c) uma breve nota sobre neutrinos e antineutrinos; (d) analogia musical.

Hobson (2005) propôs uma mudança conceitual na forma de abordar a FQ não-relativística nas disciplinas gerais de física moderna dos cursos de graduação. O autor argumenta que a instrução tradicional trata a radiação como ondas eletromagnéticas quantizadas, enquanto que a matéria é entendida como sendo partículas acompanhadas de uma função de onda. Segundo o autor, a teoria quântica de campos, por ter uma visão mais unificadora, pode dispersar as concepções newtonianas dos alunos sobre a matéria, além de resolver o paradoxo onda-partícula.

Ao incorporar um diálogo filosófico sobre realidade física dentro do processo instrucional da FQ, Karakostas e Hadzidaki (2005) examinaram a compatibilidade entre o realismo científico e o construtivismo contrastando-os com a estrutura conceitual da FQ. Os autores sugerem que uma interpretação realista da FQ não é apenas possível, mas também necessária para revelar os significados mais profundos do conteúdo científico da teoria.

Marques e Silva (2005) desenvolveram e implementaram uma unidade didática sobre astrofísica para preparar estudantes de ensino médio para a V Olimpíada Brasileira de Astronomia. Entre os tópicos abordados pelos autores, destacam-se noções de relatividade restrita e geral, comportamento dual da luz e reações nucleares. No entanto, o trabalho não apresenta resultados de pesquisa.

Medeiros e Medeiros (2005) defenderam a importância da alegria no ensino de ciências e apresentaram a dimensão do mistério e o conflito cognitivo no uso de brinquedos no ensino de física moderna. Fundamentados nos trabalhos de Vygotsky e inspirados nas reflexões de Einstein e outros pensadores, os autores apresentaram o princípio da equivalência entre massa-energia através do elevador de Einstein.

A partir de experimentos de interferência luminosa, Ostermann e Prado (2005) apresentaram um texto sobre quatro grandes escolas de interpretações da FQ, dando especial ênfase à interpretação dos universos paralelos de Everett. As autoras discutiram a interferência nos regimes clássico e quântico (experimento monofotônico) e apresentaram as interpretações de cada escola de pensamento, sendo elas: a interpretação ondulatória-realista; interpretação da

complementaridade; a interpretação dualista-realista; a interpretação dos muitos mundos.

Ogborn e Taylor (2005) apresentaram uma discussão na qual as leis de Newton podem ser vistas como sendo conseqüências das leis fundamentais da FQ. Lançando mão do princípio da menor ação de Feynman, os autores demonstraram o princípio fundamental da mecânica clássica. Alguns enunciados tais como “os fótons exploram todos os caminhos” também foi discutido.

Em outro trabalho, Ogborn (2005) propôs quatro etapas para introduzir a relatividade especial para estudantes de do chamado *A-level*⁴. Em defesa da idéia de que “menos pode ser mais”, o autor abriu mão do formalismo presente nas transformadas de Lorentz e sugeriu os seguintes passos: (a) medida do radar da distância e velocidades relativas; (b) efeito Doppler relativístico; (c) mapas do espaço-tempo – o intervalo invariante entre espaço-tempo, dilatação temporal; (d) energia, momento e massa – massa e energia de repouso. O autor argumentou que, não tendo a pretensão de oferecer um curso completo de relatividade, cada professor deve escolher até onde (mesmo após a primeira etapa) deve avançar.

Lovell (2005) utilizou argumentos simples de dinâmica e de geometria espacial para explicar os efeitos da Relatividade Geral aplicados ao campo gravitacional num espaço tridimensional comum. O autor apresentou os diferentes resultados obtidos por moradores de diferentes andares de um edifício muito alto quando o mesmo evento é observado. Efeitos como o desvio gravitacional para o vermelho, a dilatação do tempo e o espaço curvo foram discutidos.

Williams (2005) descreveu uma breve história da antimatéria. Após apresentar as descobertas das principais antipartículas, o autor sugeriu que o tema fosse introduzido a estudantes mais jovens. A sugestão é de ensinar a antimatéria na medida em que se introduz o modelo do átomo.

Preocupados em explicar o conceito de não-localidade, tratado por Bell pela primeira vez em 1964, para não-especialistas e estudantes pré-universitários, Jacobs e Wiseman (2005) escreveram uma história no estilo dos mistérios de Sherlock Holmes. A trama, baseada na formulação de Mermin da ilustração “paradoxal” da não-localidade quântica descoberta por Greenberger, Horne, and Zeilinger (JACOBS e WISEMAN, 2005), trata de como a não-localidade pode ser

⁴ Nível pré-universitário.

usada para resolver um problema no qual alguém pode se perceber como o resultado de uma série de eventos normais, ainda que de certa forma improváveis.

Eichler *et al.* (2006) apresentaram “A cidade do átomo”, um *software* educativo criado para desenvolver o tema da radioatividade. Esse ambiente virtual permite o uso de uma estratégia didática baseada no jogo de papéis (RPG – *Role Playing Game*), possibilitando uma discussão sobre a produção de energia elétrica a partir de energia nuclear, permitindo a resolução de problemas relacionados à radiação.

Ostermann *et al.* (2006) desenvolveram um *software* que simula o interferômetro de Mach-Zehnder, um experimento de interferência quântica análogo ao experimento de dupla fenda. O simulador pode operar em regime monofotônico, trazendo à tona discussões a respeito do caráter quântico dos objetos microscópicos.

Santos (2006) propuseram a construção de diagramas para auxiliar o ensino de relatividade restrita. Segundo o autor, este recurso pode ser utilizado para construir instrumentos simples para demonstrar efeitos como a dilatação do tempo e a contração espacial, sem o uso do formalismo matemático. O autor também propôs a construção de um pêndulo equivalente para demonstrar a diferença no avanço temporal entre dois sistemas de referência distintos.

Johansson *et al.* (2006) descreveram as atividades da semana Einstein, evento de divulgação científica realizado na Casa da Ciência em Stockholm, Suécia, em comemoração ao Ano Mundial da Física. Sete experimentos ilustraram os trabalhos de Einstein acerca do movimento browniano, efeito fotoelétrico e a relatividade especial, publicados no ano de 1905. As atividades sobre relatividade envolveram: a dilatação temporal de Einstein e os múons cósmicos; aniquilação pósitron-elétron; a velocidade da luz; elétrons relativísticos; espectro solar. O evento contou com a participação de 260 estudantes de ensino médio, 30 professores e 25 membros do público geral.

Goff (2006) apresentou o jogo da velha quântico: uma metáfora de ensino para lidar com a natureza contra-intuitiva da superposição de estados exibida pelos sistemas quânticos. Segundo o autor, o jogo viabiliza a introduzir de FQ no ensino médio sem o uso de matemática avançada. Após adicionar uma única regra de superposição ao jogo da velha clássico, o autor mostrou ser possível ilustrar os principais conceitos da FQ, tais como estado de um sistema, superposição, colapso,

não-localidade, emaranhamento, princípio da correspondência, interferência e correspondência.

Kenny (2006) apresentou uma derivação alternativa para a dilatação temporal na relatividade especial. Segundo o autor, a fórmula de Lorentz para a dilatação do tempo pode ser obtida a partir de um gráfico de posição versus tempo *plotado* para uma espaçonave se comunicando com a Terra. Além da dilatação temporal, o autor também discutiu o paradoxo dos gêmeos, a contração do comprimento e a experiência “vivida” pelo tripulante da nave.

Mårtensson-Pendrill (2006) argumentou que o projeto Manhattan pode mostrar aos alunos como a vida e os trabalhos de físicos são moldados por eventos sociais. A autora comentou brevemente sua experiência num curso interdisciplinar para futuros professores; situação em que pesquisaram em artigos, livros e páginas da web sobre os principais físicos envolvidos no desenvolvimento da bomba nuclear. O contexto político-histórico foi amplamente discutido.

Ostermann e Ferreira (2006) apresentaram uma introdução à supercondutividade. Preocupadas com a atualização do currículo de física de ensino médio, as autoras propuseram uma forma adequada de abordar esse tema mediante a discussão das principais propriedades dos supercondutores. As autoras discutiram os seguintes tópicos: condução eletrônica em metais – um modelo simples de metal, corrente elétrica, resistência elétrica, resistência elétrica dependente da temperatura; supercondutividade – resistência elétrica zero, efeito Meissner, transição de fase eletrônica, materiais supercondutores.

Kovačević e Djordjevich (2006) apresentaram uma analogia mecânica para o efeito fotoelétrico, assunto presente no currículo do último ano do ensino médio das escolas de Sérvia e Montenegro. Preocupados com o ensino desse tema, os autores propuseram um sistema de bolas rígidas e coloridas (onde cada cor corresponde a uma frequência do espectro luminoso) que deslizam sem atrito sobre uma rampa e colidem com outra bola rígida, lançando-a para fora do sistema. A energia inicial de cada fóton (bolas coloridas), bem como a função trabalho do material foto-emissor e a energia cinética máxima do elétron emitido, são analisados em termos de diferença de altura em relação ao ponto mais baixo da rampa.

Ireson (2006) propôs uma metodologia para medir a temperatura de transição de um material supercondutor. Após discutir as medidas da resistência elétrica e da temperatura de transição da amostra (YBCO), o autor sugeriu a construção de uma

tabela com valores de tensão, corrente elétrica, resistência elétrica e temperatura. Os resultados podem ser observados mediante a construção de um gráfico.

Preocupados em não transformar as aulas de partículas elementares do ensino médio num zoológico de partículas e reações sem significado, Berg e Hoekzema (2006) propuseram uma abordagem centrada nas leis de conservação, nas simetrias e nos diagramas de Feynman. Esse enfoque, segundo os autores, possibilita o aluno avaliar se é possível ocorrer uma reação ou não, além de derivar outras reações por simetria. O método pedagógico utilizado pelos autores é o rápido *feedback*: uma série de atividades curtas que o aluno desenvolve individualmente e em seguida discute com o professor. Embora os autores tenham descrito o andamento de duas aulas, o trabalho não apresenta resultados de pesquisa.

No intuito de promover um entendimento qualitativo acurado sobre as origens dos diagramas de Feynman como representação das interações entre partículas, Daniel (2006) apresentou uma introdução à teoria quântica de campos. Segundo o autor, a combinação de diagramas elementares para a construção de novos diagramas é a principal característica do modelo padrão. O artigo apresentou uma discussão sobre: campos quânticos; partículas; modelo padrão; diagramas de Feynman; interações eletromagnéticas; construção de diagramas a partir de processos elementares; hierarquia dos diagramas; interação fraca, e interação forte.

Sánchez e Selva (2006) propuseram uma unidade didática para o ensino de relatividade no ensino médio. Após discutir as deficiências do ensino tradicional, o autor desenvolveu algumas atividades do programa guia sugerido, destacando a definição de quadri-vetor, o uso dos diagramas espaço-tempo e impulso-energia e o conceito de massa invariante. O autor também destacou a importância das atividades no contexto Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e o papel da avaliação e o uso de recursos no processo de ensino-aprendizagem de relatividade.

Preocupado em mostrar aos estudantes como as soluções da FQ se reduzem a comportamentos clássicos nos limites de alta energia e de curto comprimento de onda, Yoder (2006) apresentou as soluções clássicas e quânticas de três sistemas físicos simples. O autor utilizou as equações clássicas do movimento para determinar a função densidade de probabilidade e comparou com a função densidade de probabilidade de um sistema quântico em estado estacionário com a mesma energia.

Mald (2006) apresentou uma estratégia didática que enfatiza a ferramenta matemática necessária para a formulação da teoria da relatividade geral. Após discutir aspectos da geometria diferencial, o autor apresentou duas formas de abordar o referido tema: (a) ensinando a teoria da relatividade em nível pré-universitário; (b) ensinando a teoria da relatividade em nível de graduação.

Após analisar o ensino da TRR em escolas de ensino médio e criticar os métodos tradicionais de ensino dessa teoria, Pérez e Solbes (2006) propuseram uma estratégia didática inovadora para abordar o referido tema. Segundo os autores, é possível proporcionar um ensino adequado dos princípios da relatividade que promova, nos estudantes, mudanças conceituais, metodológicas e de atitudes.

2.1.4 Análise de publicações relacionadas ao ensino de FMC

A presente categoria refere-se a trabalhos que revisaram livros didáticos de física, revistas e periódicos especializados em ensino de ciências e currículos escolares que contemplam temas de FMC.

Greca e Moreira (2001) fizeram uma revisão na literatura sobre estudos relativos ao ensino introdutório de FQ. Após classificar os trabalhos em três grandes categorias – concepções dos estudantes, críticas à abordagem tradicional e propostas de inovações didáticas – os autores apontaram para a escassez de trabalhos que investigam as concepções dos estudantes acerca de conceitos de FQ.

Ostermann e Ricci (2002), ao analisarem criticamente alguns livros didáticos de nível médio que abordam noções da relatividade restrita, concluíram que a grande maioria, quando não apresenta a teoria de forma muito superficial, apresenta em seus textos erros conceituais a respeito da contração de Lorentz-FitzGerald e a aparência visual de objetos relativísticos. Em outro estudo (OSTERMANN e RICCI 2004), os autores analisaram dois conceitos amplamente difundidos nos livros didáticos que introduzem a relatividade restrita: massa relativística e a equivalência massa-energia. Os autores constataram que os textos, além de interpretar de forma errônea a equivalência massa-energia, delegam ao conceito de massa relativística

uma importância fundamental, quando, de fato, trata-se de um conceito inadequado que não deveria ser abordado.

Lobato e Greca (2005) fizeram uma análise dos programas curriculares de ensino médio de vários países que contemplam temas de FMC. Foram analisadas as grades curriculares dos seguintes países: Portugal; Espanha; França; Reino Unido; Dinamarca; Suécia; Canadá; Austrália; Itália; Finlândia. Os temas de FMC encontrados nesse estudo são: quantização e a constante de Planck, dualidade onda-partícula, princípio de incerteza, física atômica e nuclear, física de partículas, efeito fotoelétrico e modelos atômicos.

2.2 SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA

Apresentamos uma revisão da produção acadêmica recente sobre FMC no Brasil e no exterior e classificamos os artigos consultados em quatro categorias abrangentes. A maioria dos trabalhos analisados (61%) foi classificada na categoria “c” (bibliografia de consulta para professores) e estão distribuídas em cinco tipos de produção acadêmica. Os trabalhos desta categoria se distribuem da seguinte forma: 43 textos didáticos sobre temas de FMC direcionados aos professores de física de nível médio e universitário; 11 propostas de unidades didáticas ou estratégias de ensino para abordar tópicos de FMC; 14 propostas de recursos didáticos, tais como *softwares*, pôsteres, atividades experimentais, diagramas, brinquedos e jogos; 3 relatos de divulgação científica e 10 posicionamentos filosóficos sobre FQ.

Do total de 108 artigos encontrados, somente 20 apresentaram propostas testadas em sala de aula com resultados de aprendizagem e 14 levantaram concepções, idéias prévias, modelos mentais, invariantes operatórios ou o perfil conceitual de professores e alunos acerca de temas de FMC. Dos 35 trabalhos mencionados nas categorias “a” e “b”, 4 foram citados em ambas categorias.

Apesar dos muitos trabalhos pertencentes às categorias “a” e “b” referentes às mudanças de enfoque no ensino de FQ introdutória em cursos de graduação e à inserção de FMC no ensino médio, apenas 4 envolveram a FMC na formação inicial e continuada de professores. Esse resultado aponta para a escassez de estudos que se ocupam com o ensino de FQ na formação de professores, processo de

fundamental importância para a construção de estratégias e ações capazes de promover mudanças significativas na educação básica brasileira. 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 e PRADO, 2005).

É possível constatar que, apesar do notável aumento do número de trabalhos publicados na área de ensino de ciências, relativos ao ensino de FMC, que apresentam propostas testadas em sala de aula com resultados de aprendizagem, bem como levantamento de concepções, idéias prévias, modelos mentais, invariantes operatórios ou perfil conceitual de professores e de alunos acerca de temas de FMC, a maioria das publicações ainda trata de divulgação científica, textos didáticos, recursos didáticos e propostas de estratégias inovadoras de ensino apresentadas como bibliografia de consulta para o professor de nível médio. Esta revisão da literatura, portanto, corrobora a importância do objetivo desta pesquisa, qual seja, melhorar a formação inicial do professor de Física no que se refere a aspectos conceituais de FQ.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A TEORIA DA MEDIAÇÃO DE L. S. VYGOTSKY

Tendo em vista a construção e negociação de significados em sala de aula, a partir do uso do IMZ virtual, apresentamos aqui alguns aspectos da fundamentação teórica que sustenta o presente estudo: a teoria da mediação de Lev Semionovich Vygotsky (1896-1934). A obra de Vygotsky pode ser considerada como uma aplicação do materialismo histórico e dialético relevante para a psicologia (VYGOTSKY, 1994, p. 8). Segundo esta perspectiva, as mudanças históricas na sociedade e na vida material produzem mudanças na natureza humana. Vygotsky tratou de relacionar a totalidade do método marxista ao estudo científico da mente.

3.1.1 O método dialético

Para Vygotsky (1994), o desenvolvimento psicológico dos homens é parte do desenvolvimento histórico geral de nossa espécie e assim deve ser entendido. O objetivo das pesquisas de Vygotsky consiste em caracterizar os aspectos tipicamente humanos do comportamento e compreender como essas características se formam ao longo da história humana, assim como durante a vida de um indivíduo. Ele buscou estabelecer a relação entre os homens e o seu ambiente físico e social, as atividades que fizeram do trabalho o meio fundamental de relacionamento entre o homem e a natureza, além das conseqüências psicológicas de tais atividades. Em outras palavras, Vygotsky investigou a natureza das relações entre o uso de instrumentos e o desenvolvimento da linguagem.

A metodologia de análise vygotskyana consiste: na análise dos processos em oposição à análise do objeto; na análise explicativa em oposição à descritiva, isto é, na análise que revela as relações dinâmicas ou causais, reais, e não na simples enumeração das características externas de um processo. Segundo Vygotsky, o

princípio básico do método dialético consiste em estudar alguma coisa no seu processo de mudança, isto é, estudá-lo historicamente.

3.1.2 A importância da fala

Para Vygotsky, a maturação é um fator de ordem secundária no desenvolvimento das formas complexas do comportamento humano. Tais fenômenos complexos não podem ser descritos de forma adequada mediante a noção que pressupõe a maturação como sendo um processo passivo. Entretanto, a psicologia, em sua época, ainda utilizava analogias botânicas na descrição do desenvolvimento da criança. Uma forte evidência disso é o uso corrente do termo “jardim de infância” para designar a primeira etapa da educação escolar infantil.

Em resposta a essa crítica, a psicologia moderna progrediu em sua explicação científica mediante o emprego de modelos zoológicos como base de uma nova abordagem geral na compreensão do desenvolvimento da criança. Muitos pontos comuns entre o comportamento infantil e animal têm sido estabelecidos, em particular no estudo do que Vygotsky define como sendo os *processos psicológicos elementares*⁵.

Segundo Vygotsky, o sistema de atividade da criança é determinado em cada estágio específico, tanto pelo seu grau de desenvolvimento orgânico quanto pelo grau de domínio no uso de instrumentos (1994, p.28). A experiência social parece exercer seu papel através do processo de imitação. Imitando a forma pela qual o adulto utiliza instrumentos e manipula objetos, a criança passa a dominar o princípio fundamental envolvido numa atividade particular. A fala tem um papel essencial na organização das *funções psicológicas superiores*⁶. Vygotsky afirma que investigadores da inteligência prática, bem como do desenvolvimento da fala não reconhecem, com freqüência, a relação íntima existente entre essas duas funções. Segundo ele, O comportamento adaptativo das crianças e a atividade de uso de signos são tratados como fenômenos paralelos – uma visão que leva ao conceito de fala ‘egocêntrica’ de Piaget (1984, p. 32).

⁵ Processos de origem biológica.

⁶ Processos de origem sócio-cultural.

Vygotsky atribui à atividade simbólica uma função organizadora que produz formas fundamentalmente novas de comportamento durante o processo de uso de instrumentos. Para ele, o momento de maior significado no curso do desenvolvimento intelectual ocorre quando o desenvolvimento da fala e da atividade prática convergem. É a junção articulada desses processos que dá origem às formas puramente humanas de inteligência prática e abstrata. A fala da criança é tão importante quanto a sua ação durante a execução de uma tarefa. Na perspectiva de Vygotsky (1984, p. 34):

As crianças não ficam simplesmente falando o que elas estão fazendo; sua fala e ação fazem parte de uma mesma função psicológica complexa, dirigida para a solução do problema em questão [...] Quanto mais complexa a ação exigida pela situação e menos direta a solução, maior a importância que a fala adquire na operação como um todo.

Às vezes, a fala adquire uma importância tão vital que a proibição do seu uso, em atividades mais elaboradas, torna as crianças pequenas incapazes de resolver algumas tarefas. Eles enfrentam as situações práticas com a ajuda da fala, assim como dos olhos e das mãos. A quantidade de fala egocêntrica da criança é diretamente proporcional ao grau de dificuldade da atividade enfrentada por ela.

O desenvolvimento da capacidade de usar a linguagem como um instrumento para a solução de problemas ocorre no instante em que a fala socializada, utilizada para se dirigir aos adultos, é internalizada. Em vez de recorrer a um adulto, a criança passa a contar consigo mesma. É a partir desse momento que a linguagem, de uso interpessoal, passa a adquirir também uma função intrapessoal.

3.1.3 O signo

Vygotsky chama a atenção para a espécie mais primitiva de memória: a memória natural. Dominantes no comportamento de povos iletrados, a memória natural caracteriza-se pela impressão não mediada de materiais. Existem, entretanto, outros tipos de memória que se originam a partir do uso de instrumentos. Mesmo as operações relativamente simples, como dar um nó num laço ou marcar

um pedaço de madeira no intuito de lembrar-se de alguma coisa, modificam a estrutura psicológica do processo de memória. Segundo Vygotsky, Elas estendem a operação de memória para além das dimensões biológicas do sistema nervoso humano, permitindo incorporar a ele estímulos artificiais, ou autogerados, que chamamos de signos (1994, p. 52).

Ao contrário das funções elementares, que têm como principal característica o fato de serem diretamente determinadas pelo meio, as funções psicológicas superiores consistem essencialmente em estimulações autogeradas. São as criações de estímulos artificiais que passam a governar o comportamento do indivíduo.

As funções psicológicas superiores estão sujeitas à mesma lei fundamental do desenvolvimento que se aplica aos processos elementares. Elas surgem ao longo do curso geral do desenvolvimento psicológico da criança não como algo introduzido de fora para dentro, mas sim como resultado do mesmo processo dialético. Dentro de um processo geral do desenvolvimento, Vygotsky define os processos elementares como sendo os processos psicológicos de origem biológica. Por outro lado, as funções psicológicas superiores são os processos cognitivos de origem sociocultural. A história do comportamento da criança surge do embricamento desses dois processos. Pode-se dizer que esses sistemas de transição estão entre o que é biologicamente dado e o que é culturalmente adquirido. Vygotsky define essa transição como sendo a *história natural do signo*.

3.1.4 Relação entre instrumentos e signos

Para Vygotsky, a invenção e o uso dos signos como meios auxiliares para solucionar determinados problemas psicológicos tais como lembrar, escolher, comparar coisas, é semelhante à invenção e ao uso de instrumentos. O signo atua como um instrumento da atividade psicológica e tem a mesma função que os instrumentos utilizados pelo homem no trabalho. O ponto central da análise, portanto, passa a ser: os pontos comuns a esses dois tipos de atividade; as diferenças básicas entre elas; o elo psicológico real existente entre uma e outra.

A semelhança mais fundamental entre signo e instrumento repousa na função mediadora que os caracteriza. Por outro lado, a diferença mais essencial entre eles consiste na forma com que eles orientam o comportamento. O instrumento serve como um meio que conduz a influência humana até o objeto. Pode-se dizer, nesse caso, que o instrumento é orientado externamente e necessariamente altera os objetos. A atividade humana externa passa a ser dirigida para o controle e domínio a natureza mediante o uso do instrumento. O signo, por outro lado, não altera em nada o objeto da operação psicológica. O signo é orientado internamente e constitui o meio pelo qual a atividade interna passa a ser dirigida para o controle e domínio do próprio indivíduo (1994, p. 73). Dessa forma, o controle da natureza e o controle do comportamento humano estão interligados de tal forma que um implica no outro, assim como a alteração provocada pelo homem sobre a natureza altera a própria natureza do homem (VYGOTSKY, 1994, p. 73).

O uso de meios artificiais durante a atividade cognitiva altera fundamentalmente todas as operações psicológicas da mesma maneira que o uso de instrumentos amplia de forma ilimitada o leque de atividades em que as novas funções psicológicas podem operar.

Vygotsky define *internalização* como sendo a reconstrução interna de uma operação externa (1994, p. 74). O processo de internalização consiste nas seguintes transformações: (a) a operação que representa inicialmente uma atividade externa é reconstruída e começa a ocorrer internamente; (b) um determinado processo interpessoal é transformado num processo intrapessoal; (c) a transformação de um processo interpessoal num processo intrapessoal resulta de uma longa série de eventos ocorridos ao longo do desenvolvimento. Para Vygotsky (1994, p. 75): “*Todas as funções superiores originam-se das relações reais entre indivíduos humanos.*”

Torna-se evidente, portanto, que internalização de formas culturais de comportamento envolve a reconstrução da atividade psicológica tendo como base as operações com signos.

3.1.5 Zona de desenvolvimento proximal

Vygotsky afirma que nos estudos do desenvolvimento cognitivo de crianças admite-se, erroneamente, que só é indicativo da capacidade mental aquilo que as crianças conseguem fazer sozinhas. Segundo Vygotsky (1994, p. 111):

Por mais de uma década, mesmo os pensadores mais sagazes nunca questionaram esse fato; nunca consideraram a noção de que aquilo que as crianças conseguem fazer com ajuda dos outros poderia ser, de alguma maneira, muito mais indicativo de seu desenvolvimento mental do que aquilo que ela consegue fazer sozinha.

Partindo dessa perspectiva, pode-se definir dois níveis de desenvolvimento em sala de aula: o *desenvolvimento real*, nível em que o aluno consegue resolver problemas por si mesmo; e o *desenvolvimento potencial*, nível em que o aluno só consegue resolvê-los sob a orientação de um adulto ou em colaboração com um parceiro mais capaz (1994, p. 112). Vygotsky define a *zona de desenvolvimento proximal* como sendo a distância entre estes dois níveis. Segundo Vygotsky (1994, p. 113):

A zona de desenvolvimento proximal define aquelas funções que ainda não amadureceram, mas que estão em processo de maturação, funções que amadurecerão, mas que estão presentemente em estado embrionário.

Esta é a razão pelo qual os animais são incapazes de aprender (no sentido humano do termo). A aprendizagem humana requer uma natureza social e um processo no qual os estudantes se integram na vida intelectual daqueles que os cercam. Em outras palavras, um aspecto essencial do aprendizado é o fato de ele criar a zona de desenvolvimento proximal. Dessa forma, a aprendizagem desencadeia vários processos internos de desenvolvimento capazes de operar somente quando o aluno interage com pessoas em seu meio, o professor por exemplo, em colaboração com seus parceiros. Uma vez internalizados, esses processos passam a ser parte do desenvolvimento independente do estudante.

Partindo da perspectiva vygotskyana de que a linguagem, enquanto um sistema complexo de signos, exerce um papel fundamental no desenvolvimento das funções psicológicas superiores, utilizamos no presente trabalho, do ponto de vista metodológico, a análise discursiva proposta por M. M. Bakhtin.

3.2 A FILOSOFIA SOCIOLINGÜÍSTICA DE M. M. BAKHTIN

Embora Vygotsky estivesse interessado em formular uma teoria psicológica com bases marxistas, ele acabou fazendo pouca menção aos aspectos históricos, culturais e institucionais mais amplos, tais como as lutas de classes, a alienação e o consumismo (WERTCH, 1993, p. 65). A ausência dos aspectos sociais mais amplos em sua teoria se deve, provavelmente, a sua morte prematura por tuberculose, aos trinta e sete anos de idade.

Tendo em vista a análise discursiva de estudantes de física, à luz do referencial sociocultural, apresentamos alguns aspectos da filosofia da linguagem de Mikhail Mikhailovitch Bakhtin (1895-1975). Assumimos nessa pesquisa que sua obra pode dar continuidade à obra inacabada de Vygotsky.

3.2.1 O signo ideológico

A filosofia da linguagem de Bakhtin (2006), e de seus colaboradores⁷, coloca a enunciação como estrutura sócio-ideológica. Para Bakhtin, todo signo é ideológico – a filosofia da linguagem é concebida como sendo a filosofia do signo ideológico. Bakhtin valoriza a fala, a enunciação e afirma sua natureza social, e não individual, definindo a língua como expressão das relações e lutas sociais.

Bakhtin defende um signo dialético, dinâmico, vivo, contrário ao “sinal” inerte que surge da análise da língua como um sistema sincrônico abstrato, morto e vazio de ideologia. O signo é criado por uma função ideológica precisa e permanece inseparável dela. Não é a atividade mental que organiza a expressão, mas é a expressão que organiza a atividade mental, modelando e determinando sua orientação. A existência do signo nada mais é do que a materialização da comunicação social. Todo fenômeno que funciona como signo ideológico tem uma encarnação material, seja no som, em um objeto concreto, em uma cor ou em outra

⁷ Existe uma polêmica acerca da verdadeira autoria do livro *Marxismo e Filosofia da Linguagem*. As primeiras edições atribuem a obra a V. N. Volochínov.

coisa qualquer. É justamente nisso que consiste a natureza de todos os signos ideológicos. Fora de sua objetivação, de sua realização concreta em um material determinado (o gesto, a palavra, o grito), a consciência é simplesmente uma ficção (2006, p.122).

3.2.2 Dialogicidade ou pluralidade de vozes

A unidade real da língua, que é realizada na fala, não é a enunciação monológica individual e isolada, mas a interação de pelo menos duas enunciações, isto é, o diálogo. Para Bakhtin, a enunciação é um elemento do diálogo, fazendo parte de um processo de comunicação ininterrupto. Toda a enunciação, mesmo na forma imobilizada da escrita, é sempre uma resposta a alguma coisa e é construída como tal. Segundo Bakhtin, toda enunciação efetiva, seja qual for a sua forma, contém sempre, com maior ou menor nitidez, a indicação de um acordo ou de um desacordo com alguma coisa (2006, p. 111).

Toda palavra comporta duas facetas. Ela é determinada tanto pelo fato de que procede de alguém, como pelo fato de que se dirige para alguém. Ela constitui justamente o produto da interação do locutor e do ouvinte.

A palavra, dirigindo-se a um interlocutor, torna-se função da pessoa desse interlocutor. A enunciação dependerá do fato de se tratar de uma pessoa do mesmo grupo social ou não, do fato desta ser inferior ou superior na hierarquia social, ou ainda, do fato do ouvinte estar ligado ao locutor por laços sociais mais ou menos estreitos. É indispensável que o locutor e o ouvinte estejam integrados na unicidade da situação social imediata. O signo e a situação social em que se inserem estão indissoluvelmente ligados. A situação social mais imediata e o meio social mais amplo determinam completamente a estrutura da enunciação. Nas palavras de Bakhtin (2006, p. 126):

A enunciação enquanto tal é um puro produto da interação social, quer se trate de um ato de fala determinado pela situação imediata ou pelo contexto mais amplo que constitui o conjunto das condições de vida de uma determinada comunidade lingüística.

A escrita, como toda enunciação monológica, portanto, é produzida para ser compreendida, é orientada para uma leitura no contexto da vida científica ou da realidade literária do momento, isto é, no contexto do progresso ideológico do qual ela é parte integrante (2006, p. 101).

3.2.3 Os diversos significados da palavra

Para Bakhtin, um sistema de signos não pode ser construído mediante a simples presença de dois indivíduos. É necessário que o locutor e o ouvinte pertençam à mesma comunidade lingüística, isto é, que ambos pertençam a uma sociedade claramente organizada. Todo signo resulta de um consenso entre indivíduos socialmente organizados no decorrer de um processo de interação. Segundo Bakhtin (2006, p. 35):

... não basta colocar face a face dois homo sapiens quaisquer para que os signos se constituam. É fundamental que esses dois indivíduos estejam socialmente organizados, que formem um grupo (uma unidade social): só assim um sistema de signos pode constituir-se.

As formas do signo são condicionadas tanto pela organização social de tais indivíduos como pelas condições em que a interação acontece. É importante salientar que classes sociais diferentes servem-se de uma só e mesma língua. Conseqüentemente, em todo signo ideológico confrontam-se *índices de valor*⁸ contraditórios. É preciso supor certo *horizonte social*⁹ definido e estabelecido que determine a criação ideológica de um determinado grupo social e da época a que este grupo pertence (2006, p. 116). O signo se torna, portanto, a arena onde se desenvolve a luta de classes.

Para um falante, a palavra não se apresenta como um item de dicionário, mas como parte das mais diversas enunciações dos locutores de sua comunidade e das inúmeras enunciações de sua própria prática lingüística. A palavra está sempre

⁸ Conjunto das significações que tem maior destaque para um dado interlocutor no momento em que aprecia o enunciado.

⁹ Fragmentos materiais que possuem valor semiótico para um grupo social.

carregada de um conteúdo ou de um sentido ideológico ou vivencial. Não são palavras o que pronunciamos ou escutamos, mas verdades ou mentiras, coisas boas ou más, importantes ou triviais, agradáveis ou desagradáveis. A língua, no seu uso prático, não pode ser separada de seu conteúdo ideológico ou relativo à vida. O sentido da palavra é totalmente determinado por seu contexto. De fato, há tantas significações possíveis quantos contextos possíveis. Segundo Bakhtin, a dialética é a única maneira de conciliar a polissemia da palavra com sua unidade.

3.2.4 O enunciado

Tendo em vista a análise discursiva, Bakhtin atribui ao enunciado um sentido definido e único, uma significação unitária. Bakhtin define o sentido da enunciação completa, isto é, a propriedade que pertence a cada enunciação como um todo, como sendo o seu *tema*. Além do tema, ou, mais exatamente, no interior dele, a enunciação é igualmente dotada de uma *significação*. Por significação, diferentemente do tema, entende-se *os elementos da enunciação que são reiteráveis e idênticos cada vez que são repetidos*. O tema é um sistema de signos dinâmicos e complexos, que procura adaptar-se adequadamente às condições de um dado momento da evolução. A significação é um aparato técnico para a realização do tema. Bem entendido, é impossível traçar uma fronteira mecânica absoluta entre a significação e o tema. A maneira mais correta de formular a inter-relação do tema e da significação é a seguinte: o tema constitui o estágio superior real da capacidade lingüística de significar. De fato, apenas o tema significa de maneira determinada. A significação é o estágio inferior da capacidade de significar. A significação não quer dizer nada em si mesma, ela é apenas um potencial, uma possibilidade de significar no interior de um tema concreto.

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 nossa compreensão. A compreensão é uma forma de diálogo; ela está para a enunciação assim como uma réplica está para a outra no diálogo. Compreender é opor à palavra do locutor uma contrapalavra. A significação não está na palavra nem na alma do falante, assim

como também não está na alma do interlocutor. Ela é o efeito da interação do locutor e do receptor produzido através do material de um determinado complexo sonoro. Se um complexo sonoro qualquer comportasse uma única significação inerte e imutável, então esse complexo não seria uma palavra, não seria um signo, mas apenas um sinal. A multiplicidade das significações é o índice que faz de uma palavra um signo ideológico.

Toda palavra usada na fala real possui não apenas tema e significação no sentido objetivo, de conteúdo, desses termos, mas também um acento de valor ou *apreciativo*, isto é, quando um conteúdo objetivo é expresso (dito ou escrito) pela fala viva, ele é sempre acompanhado por um acento apreciativo determinado. Sem acento apreciativo, não há palavra. Toda enunciação compreende, antes de qualquer coisa, uma orientação apreciativa.

3.2.5 Análise do discurso

Para Bakhtin, na base da divisão do discurso em partes, denominadas parágrafos na sua forma escrita, encontra-se o ajustamento às reações previstas do ouvinte ou do leitor. Os parágrafos não comportam necessariamente uma unidade de pensamento completa; eles são análogos às replicas de um diálogo. Os tipos clássicos de parágrafos são: perguntas e respostas (o autor faz as perguntas e dá as respostas); suplementação; antecipação de possíveis objeções; exposição de aparentes incoerências ou contradições no próprio discurso, etc. É particularmente comum tomar como objeto de discussão o próprio discurso ou parte dele (por exemplo, o parágrafo precedente). Neste caso, a atenção do falante transfere-se do objeto do discurso para o próprio discurso (reflexão sobre o próprio discurso). Essa mudança de pólo de interesse do discurso é condicionada pela atenção do ouvinte.

Outro ponto da análise discursiva de Bakhtin é o discurso citado, isto é, a apropriação de enunciados de outrem por parte do locutor. Para Bakhtin, o discurso citado é o discurso no discurso, mas, ao mesmo tempo, é o discurso do discurso, é a enunciação da enunciação. Segundo Bakhtin, os mecanismos de apreensão ativa, apreciativa, do discurso de outrem são socialmente pertinentes e constantes e têm seu fundamento na existência econômica de uma comunidade lingüística

determinada (2006, p. 152). Existem diferenças essenciais entre a recepção ativa da enunciação de outrem e sua transmissão no interior de um contexto. Toda transmissão, especialmente sob a forma escrita, tem uma finalidade específica: narrativa, processos legais, polêmica científica, etc. Além disso, a transmissão leva em conta uma terceira pessoa, isto é, a pessoa a quem estão sendo transmitidas as enunciações citadas. Essa orientação reforça a influência das forças sociais organizadas sobre o modo de apreensão do discurso.

O discurso citado e o contexto de transmissão são somente os termos de uma inter-relação dinâmica. Essa dinâmica, por sua vez, reflete a dinâmica da inter-relação social dos indivíduos na comunicação ideológica verbal. Há duas orientações acerca da dinâmica da inter-relação entre o discurso narrado e o discurso citado:

Na primeira, a tendência fundamental da reação ativa ao discurso de outrem pode visar à conservação da sua integridade e autenticidade. No quadro da primeira orientação, convém discernir igualmente o grau de firmeza ideológica, o grau de autoritarismo e de dogmatismo que acompanha a apreensão do discurso. Pode-se definir essa primeira orientação na qual se move o dinamismo da interorientação entre o discurso narrativo e o discurso citado como sendo o *estilo linear*.

Na segunda orientação da dinâmica de inter-relação da enunciação e do discurso citado, observam-se processos de natureza exatamente oposta. A língua elabora meios mais sutis e mais versáteis para permitir ao autor infiltrar suas réplicas e seus comentários no discurso de outrem. Podemos chamar esse estilo de transmissão do discurso de outrem de *estilo pictórico*. É importante frisar que o discurso retórico, diferentemente do discurso literário, pela própria natureza da sua orientação, não é tão livre na sua maneira de tratar as palavras de outrem. Ele tem, de forma inerente, um sentimento agudo dos direitos de propriedade da palavra e uma preocupação exagerada com a autenticidade.

Outro aspecto importante da análise discursiva é a definição de gênero discursivo (WERTCH 1993, p. 80). Segundo Bakhtin, o gênero discursivo é uma forma típica de enunciado, relativamente estável, que corresponde a situações típicas de situação verbal. Não se trata de uma forma de linguagem, mas sim de um tipo de enunciado que inclui uma determinada classe típica de expressões que lhe são inerentes, no qual a palavra adquire uma expressão particular típica. Para Bakhtin, a produção de qualquer enunciado implica a invocação de um gênero

discursivo. Todos nossos enunciados têm formas de construção globais típicas, definidas e relativamente estáveis. Na perspectiva bakhtiniana, um locutor sempre apela para a linguagem social ao produzir um enunciado. Essa linguagem social dá forma ao que a voz do locutor pode falar. Uma classe particular de dialogicidade ou pluralidade de vozes é a *ventrilocução*.

Para Bakhtin, *ventrilocução* é o processo pelo qual uma voz fala através de outra voz ou tipo de voz na linguagem social (WERTCH 1993, p. 78). A palavra na linguagem é sempre em parte de outrem. Ela só se torna propriedade do locutor quando ele a utiliza com sua própria intenção, com seu próprio acento, isto é, quando ele se apropria da palavra.

3.3 UMA FERRAMENTA DE ANÁLISE

Além de se apoiar em alguns aspectos da teoria da mediação de Vygotsky e da filosofia sociolingüística de Bakhtin, utilizamos em nossa análise, uma ferramenta sociocultural elaborada por Mortimer e Scott (2002) e utilizada para analisar as interações discursivas entre professor e alunos, em situações de ensino formal em sala de aula. A estrutura analítica dessa ferramenta explora cinco aspectos: (a) intenções do professor; (b) conteúdo; (c) abordagem comunicativa; (d) padrões de interação; (e) intervenções do professor. Os dois primeiros aspectos referem-se aos focos de ensino. O terceiro aspecto está relacionado à abordagem do professor, enquanto que o quarto e o quinto dizem respeito às ações do professor.

As intenções do professor podem ser classificadas nas seguintes categorias: criar um problema, engajando os estudantes no desenvolvimento inicial do conteúdo; explorar a visão dos estudantes, eliciando as visões dos estudantes sobre fenômenos específicos; introduzir o conhecimento científico, disponibilizando as idéias científicas; guiar o trabalho dos estudantes, dando a oportunidades aos estudantes de falar e pensar com as idéias científicas; guiar a aplicação das idéias científicas, dando a oportunidades aos estudantes de aplicar as idéias científicas em diferentes contextos; sustentar o desenvolvimento do conteúdo, comentando sobre o seu desenrolar, de modo a ajudar o aluno a compreender suas relações com o currículo de ciências como um todo. (MORTIMER e SCOTT, 2002).

O conteúdo do discurso pode ser classificado em três categorias: descrição, isto é, enunciados referentes a um sistema, objeto ou fenômeno, em termos de seus constituintes; explicação, ou seja, a importação de um modelo teórico ou mecanismo para se referir a um fenômeno ou a um sistema específico; generalização, ou seja, a elaboração de uma descrição ou explicação que seja independente de um contexto específico.

A abordagem comunicativa fornece uma perspectiva de como o professor trabalha suas intenções e o conteúdo, mediante suas intervenções em sala de aula. Os autores identificaram quatro categorizações para a abordagem comunicativa: discurso dialógico, no qual o professor considera o que o estudante tem a dizer sob o ponto de vista do próprio aluno; discurso autoritário, no qual o professor considera o que o aluno tem a dizer somente do ponto de vista do discurso científico; discurso interativo, no qual ocorre com a participação de mais de uma pessoa; discurso não-interativo, no qual ocorre com a participação de uma única pessoa.

Os padrões de interação emergem na medida em que professor e alunos alternam enunciados, tais como a tríade I-R-A (iniciação do professor, resposta do aluno e avaliação do professor). É comum, no entanto, que o professor sustente o enunciado do aluno por meio de intervenções curtas, tais como as interações do tipo I-R-P-R-P-R... ou do tipo I-R-F-R-F-R..., onde P significa ações discursivas que permitem o prosseguimento da fala do aluno e F significa um *feedback* para que o aluno elabore um pouco mais sua fala. (MORTIMER e SCOTT, 2002)

As formas de intervenções pedagógicas do professor podem ser classificadas da seguinte forma: dar forma aos significados, mostrando a diferença entre dois significados; selecionar significados, considerando ou ignorando a resposta de um aluno; marcando significados chave, através de repetições de enunciados ou da mudança da entonação de voz; compartilhar significados, repetindo a fala de um estudante para toda a classe; checar o entendimento dos alunos, pedindo que o estudante explique melhor uma idéia; rever o progresso do conteúdo, recapitulando as atividades de uma aula anterior.

3.4 SÍNTESE DO REFERENCIAL TEÓRICO

No âmbito da presente investigação, o interferômetro virtual de Mach-Zehnder exerce tanto o papel de instrumento como o de signo. Enquanto instrumento, os sujeitos o utilizam para ter domínio e controle da natureza, isto é, da simulação do experimento em si. Na função de signo, os conceitos envolvidos no uso *software* são orientados internamente e constituem o meio pelo qual a atividade interna passa a ser dirigida para o controle e domínio do próprio indivíduo (internalização de novos significados). A execução de tarefas em pequenos grupos (duplas ou trios), isto é, em colaboração com outros colegas, visa a criação, por parte dos alunos, da zona de desenvolvimento proximal.

A análise do discurso tem se mostrado uma metodologia poderosa quando empregada na investigação de interações discursivas entre indivíduos que executam atividades mediadas por ferramentas socioculturais, tais como o IMZ virtual utilizado no presente estudo. A ferramenta de análise apresentada na seção anterior tem sido utilizada em outros trabalhos da área de ensino de ciências, nos quais vem sofrendo algumas adaptações na análise de interações que são de natureza diferente daquelas apresentadas por Mortimer e Scott, como, por exemplo, as interações discursivas *on-line* entre professor e estudantes (REZENDE e OSTERMANN, 2006). Tendo em vista a análise do discurso, sob o ponto de vista metodológico, adaptamos a estrutura analítica dessa ferramenta sociocultural para analisar a interação entre alunos, utilizando apenas os aspectos referentes à abordagem comunicativa e aos padrões de interação.

No âmbito do presente estudo, a análise dos enunciados dos estudantes, em atividades mediadas pelo IMZ virtual, levará em conta os seguintes aspectos do referencial teórico adotado nessa pesquisa:

1. o uso da fala egocêntrica na mediação da ação;
2. as colaborações com um parceiro mais capaz;
3. a criação da zona de desenvolvimento proximal;
4. a linguagem como expressão das relações e lutas sociais;
5. o uso de réplicas aos enunciados nos processos de compreensão
6. o uso de gêneros discursivos e de ventriloquação.
7. a abordagem comunicativa e padrões de interação.

Os resultados da análise dos diálogos serão apresentados no capítulo 5.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

4.1 ASPECTOS GERAIS

Esse estudo foi desenvolvido através do Estágio Docente, realizado pelo autor desse trabalho, junto à disciplina FIS01032 – Seminários de Tópicos Especiais em Física Geral III. A disciplina consiste em uma revisão conceitual e formal dos principais tópicos de FMC a partir da apresentação de seminários ministrados pelos próprios alunos. Inicialmente, fizemos um levantamento inicial das idéias prévias dos alunos acerca da dualidade onda-partícula, mediante a aplicação de um instrumento de medida previamente validado.

Após a aplicação do teste, realizou-se, segundo o cronograma da disciplina, uma seqüência de oito seminários sobre alguns temas da óptica ondulatória e FQ. Esses seminários abrangeram os seguintes conteúdos: reflexão e refração; interferência; polarização e difração; radiação térmica e a quantização da energia; efeito fotoelétrico e o efeito Compton; dualidade onda-partícula; princípio da incerteza de Heisenberg; a equação de Schrödinger.

Logo após a seqüência inicial de seminários, o professor da disciplina apresentou um seminário sobre o IMZ. O objetivo deste seminário foi apresentar o funcionamento do aparato experimental, mostrando a função desempenhada pelo conjunto de espelhos e semi-espelhos. O professor apresentou também uma discussão conceitual sobre o funcionamento do IMZ operando em regime clássico, revisando alguns conceitos sobre óptica ondulatória.

A seguir, implementamos em sala de aula uma atividade didática centrada no uso de um *software* livre, tipo bancada virtual, que simula o IMZ (OSTERMANN *et al.*, 2006). Adotando a óptica ondulatória como “porta de entrada” para o mundo microscópico (OSTERMANN e RICCI, 2005), utilizamos a dualidade onda-partícula como eixo central das discussões em sala de aula (PESSOA Jr., 2005), com o objetivo de estudar o comportamento de objetos quânticos, como, por exemplo, o fóton. Os alunos, organizados em duplas durante a atividade com o *software*, interagiram discursivamente a partir de um roteiro exploratório especialmente elaborado (ver apêndice B). O objetivo foi analisar os mecanismos pelos quais os

estudantes utilizam a linguagem e instrumentos na negociação e internalização de significados relativos à FQ. Os diálogos de cada dupla foram registrados em áudio e posteriormente transcritos para análise. Os enunciados dos alunos foram analisados num contexto sociocultural mais amplo, segundo alguns conceitos das teorias de Vygotsky (1994) e de Bakhtin (2006), apresentados no capítulo anterior.

Finalmente, após a intervenção didática, o professor da disciplina apresentou um seminário sobre o formalismo matemático aplicado ao IMZ. O seminário iniciou com a apresentação do formalismo usado na óptica ondulatória, mostrando a relação entre a intensidade da onda e sua amplitude e chamando a atenção para o termo responsável pelo padrão de interferência na equação que descreve o módulo quadrado da soma dos vetores campo elétrico \mathbf{E}_1 e \mathbf{E}_2 , relativos aos dois feixes que se propagam nos braços do interferômetro. Em seguida, o professor discutiu o funcionamento do IMZ em regime monofotônico, dando ênfase ao comportamento dual da matéria. Utilizando-se do IMZ virtual, o professor demonstrou a indivisibilidade do fóton, retirando o segundo espelho semi-refletor do interferômetro, e revisou alguns conceitos como função de onda e superposição de estados. A seguir, ele apresentou o formalismo matemático, na formulação da mecânica ondulatória de Schrödinger, dando ênfase ao estado de superposição do fóton, responsável pela interferência quântica.

Finalmente, o professor apresentou uma síntese das quatro principais interpretações plausíveis da mecânica quântica discutidas por Pessoa Jr. (2005), a partir dos fenômenos observados no IMZ virtual. Após iniciar sua discussão com a interpretação corpuscular e, o professor explicou a interpretação ondulatória, mostrando suas peculiaridades e limitações. Depois, o professor introduziu a interpretação dualista realista, proposta inicialmente por De Broglie, enfatizando o conceito de onda-piloto. A seguir, ele apresentou a interpretação de Copenhagen, também denominada interpretação da Complementaridade, apresentando o que Pessoa Jr. chamou de versão forte da dualidade onda-partícula (2005, p. 18). No final da aula, o professor apresentou a interpretação dos muitos mundos, proposta por Everett, segundo a discussão proposta por Ostermann e Prado (2005).

A seguir, apresentamos, de forma mais detalhada, as duas etapas metodológicas que dão sustentação a nossa investigação. Os resultados serão discutidos no próximo capítulo.

4.2 CONCEPÇÕES RELATIVAS À DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Esta fase inicial do trabalho consistiu no levantamento das concepções dos estudantes acerca da dualidade onda-partícula. Tendo em vista a construção e negociação de significados que sejam compartilhados cientificamente e assumindo a dualidade onda-partícula como a essência da FQ (FEYNMAN, 1963; PESSOA Jr., 2005), consideramos apropriada a aplicação de um teste capaz de fornecer algumas evidências acerca do conhecimento prévio dos alunos a esse respeito. Para tanto, foi necessário elaborar e validar um instrumento constituído de 16 questões sobre situações que evidenciam o comportamento dual dos objetos quânticos tais como o efeito fotoelétrico, o experimento de dupla fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder¹⁰. É importante salientar que, nessa etapa inicial, apesar de apresentarem-se os resultados da aplicação de um instrumento de medida (teste de concepções), a investigação em questão tem um enfoque qualitativo e as análises discutidas posteriormente têm um viés subjetivo-interpretativo.

O instrumento consiste de 16 questões conceituais e objetivas acerca do comportamento dual dos objetos quânticos, evidenciado no efeito fotoelétrico, no experimento de dupla fenda e no interferômetro de Mach-Zehnder. A estrutura do instrumento foi baseada no teste de concepções alternativas relativas à força e movimento elaborado por Silveira *et al.* (1992) e o conteúdo das questões foi inspirado nos trabalhos de Pessoa Jr. (2005) e Montenegro e Pessoa Jr. (2002).

Após submeter o instrumento à avaliação de especialistas em Física Quântica do Instituto de Física da UFRGS, este foi aplicado em uma amostra de 80 estudantes de graduação e pós-graduação. O critério de seleção dos sujeitos da amostra consistiu na escolha de estudantes que tivessem cursado ao menos alguma disciplina introdutória de FQ. A verificação da consistência interna do instrumento foi estimada através do cálculo do coeficiente alfa de Cronbach, cujo valor obtido foi de 0,77. Esse valor para o coeficiente de fidedignidade é tolerável, uma vez que o propósito de se aplicar o instrumento consiste em comparar sujeitos em médias, e não o de discriminar acuradamente entre diferentes sujeitos, como ocorre, por

¹⁰ Artigo submetido à Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencia.

exemplo, nos processos de seleção de concursos vestibulares (SILVEIRA, 1993). O instrumento é apresentado no apêndice A.

As primeiras quatro questões procuram investigar os conhecimentos dos licenciandos acerca do efeito fotoelétrico e de como variações na frequência e na intensidade do feixe de radiação incidente pode influenciar no resultado do experimento. As questões 5 e 6 avaliam os conhecimentos dos estudantes acerca da função trabalho. As questões de 7 a 9 e 11 testam as noções que os estudantes têm acerca do fenômeno de interferência no experimento de dupla fenda em ambos os regimes – clássico (superposição de ondas) e quântico (superposição de estados). A questão 10 aborda especificadamente a noção da medida de trajetória. As questões 12, 14 e 15 investigam o fenômeno de interferência quântica (superposição de estados) no interferômetro de Mach-Zehnder. As questões 13 e 16 abordam, respectivamente, a noção da medida de trajetória e a escolha demorada.

Este teste foi aplicado em uma turma de 14 alunos da sétima etapa do curso de licenciatura em física da UFRGS, junto à disciplina Seminários de Tópicos Especiais em Física Geral III, no dia 9 de agosto, início do segundo semestre de 2007. A amostra é constituída de estudantes que já haviam cursado duas disciplinas sobre FQ: Física do século XX – A (quantização da energia; fótons e o efeito fotoelétrico; ondas de matéria: dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza; modelos atômicos; mecânica ondulatória de Schrödinger) e Física do século XX – B (átomo de um elétron; spin, taxas de transição e regras de seleção; átomos multieletrônicos; moléculas; sólidos; modelos nucleares e partículas elementares). Os resultados da aplicação do teste são apresentados no próximo capítulo.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES MEDIADAS PELO IMZ VIRTUAL

As atividades com o IMZ virtual tiveram início no dia 18 de setembro de 2007, no horário das aulas de “Seminários III”. Os alunos foram encaminhados para o laboratório de informática, no Instituto de Física da UFRGS. Os alunos se organizaram em duplas e receberam um roteiro (ver apêndice B) especialmente elaborado para as atividades com o *software*. Três dos quatorze alunos estiveram

ausentes na primeira aula da intervenção didática de maneira que eles somavam um total de quatro duplas e um trio (A_1 e A_2 ; A_3 e A_4 ; A_5 e A_6 ; A_7 , A_8 e A_9 , A_{10} e A_{11}).

Foram disponibilizados cinco computadores equipados com microfones, um para cada grupo, cada um contendo o IMZ virtual instalado, além de um *software* gravador de som. A primeira etapa dessa intervenção didática consistiu na exploração inicial do *software* a partir do roteiro elaborado. Essa atividade teve a duração aproximada de uma hora. Os diálogos dos alunos foram gravados e posteriormente transcritos para análise. Os enunciados da primeira etapa foram separados em quatro categorias: (a) caminhos dos feixes do *laser*; (b) polarização dos feixes do *laser*; (c) interferência em regime clássico; (d) interferência em regime quântico. Os diálogos analisados são apresentados no próximo capítulo.

A segunda etapa da intervenção didática foi realizada em 25 de setembro de 2007, no mesmo horário. A atividade no laboratório de informática, que teve a duração de cerca de uma hora, consistiu na resolução de um questionário conceitual sobre os fenômenos observados no IMZ virtual (ver apêndice C). Apesar da ausência de um aluno (A_{10}) nesse segundo encontro, um dos alunos ausentes na aula anterior (A_{12}) compareceu e juntou-se ao aluno da dupla que o aluno ausente fazia parte (A_{11}). Os diálogos da segunda etapa também foram gravados e transcritos para análise. Os enunciados foram separados em duas categorias: (e) óptica ondulatória; (f) física quântica. Os resultados e suas discussões são apresentados no capítulo seguinte.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO INSTRUMENTO

A análise do resultado da aplicação do teste de concepções prévias relativas ao conceito de dualidade onda-partícula foi realizada em três etapas: análise das respostas às questões sobre o efeito fotoelétrico; análise das respostas às questões referentes ao experimento de dupla fenda; análise das respostas às questões referentes ao interferômetro de Mach-Zehnder. O quadro a seguir apresenta a distribuição das respostas dos estudantes ao longo das 16 questões. Os valores em destaque representam a alternativa correta. A média de acertos do grupo foi de 8,21, representando um percentual de 51% e o desvio padrão foi de 2,19.

5.1.1 Efeito fotoelétrico

As questões sobre o efeito fotoelétrico podem ser classificadas em três categorias: a) influência da intensidade da radiação incidente sobre a emissão de elétrons (questões 01 e 02); b) influência da frequência da radiação incidente sobre a emissão de elétrons (questões 03 e 04); e c) influência da função trabalho do metal sobre a emissão de elétrons (questões 05 e 06). As respostas referentes à categoria (a) mostram que a grande maioria dos estudantes (78,6%) desvincula corretamente a intensidade da radiação incidente com a energia dos elétrons emitidos pelo metal. No entanto, apenas 50% dos estudantes atribuíram uma redução instantânea do número de elétrons quando ocorre a redução da intensidade da radiação incidente. Aproximadamente 30% dos licenciandos parecem acreditar que essa redução do número de elétrons emitidos deve ocorrer de forma gradual.

Questões	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
01	11*	2	1	0	0
02	2	0	7*	4	1
03	5*	0	7	0	1
04	2	10*	2	0	0
05	1	0	3	1	9*
06	3	9*	1	1	0
07	0	3	1	10*	0
08	1	2	3	8*	0
09	3	6*	2	3	0
10	0	3	2*	7	2
11	1	4	3	5*	1
12	9*	3	2	0	0
13	5	3	4*	1	1
14	2	1	10*	0	1
15	4*	1	1	8	0
16	5	1	1	6*	1

Quadro 1: distribuição das respostas dos estudantes em cada item do teste. Os valores em destaque correspondem à alternativa correta.

Na categoria (b), apenas 35,7% dos estudantes desvincularam corretamente o número de elétrons emitidos pelo metal da frequência da radiação incidente contra um percentual de 50% que parecem acreditar que uma redução na frequência da radiação incidente pode ocasionar uma redução do número de elétrons emitidos. Na questão 04, 71,4% indicaram corretamente que a energia dos elétrons emitidos pelo metal aumenta com o respectivo aumento da frequência da radiação incidente.

As respostas às questões pertencentes à categoria (c) mostram que 64,3% dos estudantes parecem compreender corretamente o papel da função trabalho do metal em ambas as situações apresentadas.

5.1.2 Experimento de dupla fenda

As questões referentes ao experimento de dupla fenda podem ser classificadas em três categorias: a) interferência clássica (questão 07); b) interferência quântica (questões 08, 09 e 11); e c) a noção da medida de trajetória (questão 10). Em relação à categoria (a), 71,4% dos estudantes parecem compreender o fenômeno de interferência clássica na óptica ondulatória.

Na categoria (b), por outro lado, apenas 57,1% dos estudantes reconheceram o padrão de interferência para a emissão de fótons únicos, enquanto que 21,4% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas. Aproximadamente 43% dos licenciandos reconheceram a existência de locais proibidos para a emissão de um único fóton (regiões que correspondem a locais de interferência destrutiva da função de onda associada). Especificamente sobre esta questão (questão 09), 21,4% dos alunos escolheram a figura que permite a detecção de um fóton único em qualquer região do anteparo (sem restrições), 14,3% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas (à frente de F_1 ou à frente de F_2) e 21,4% parecem acreditar que um único fóton se divide em duas metades, atingindo o anteparo à frente de F_1 e à frente de F_2 , simultaneamente. Com relação à questão 11, apenas 35,7% dos alunos reconheceram o padrão de interferência para elétrons. 28% dos estudantes parecem acreditar que os elétrons, diferentes dos fótons, se distribuem em torno da região central do anteparo, enquanto que 21,4% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas.

Com relação à questão 10 (categoria c), somente 14,3% compreenderam a noção da medida de trajetória. A metade dos estudantes da amostra escolheu um padrão de interferência para os fótons, apesar da presença de um detector de não-demolição em F_1 . O restante da amostra se dividiu entre uma distribuição em torno da região central do anteparo (21,4%) e uma distribuição em torno da região do anteparo que se encontra à frente de F_2 .

5.1.3 Interferômetro de Mach-Zehnder

As questões referentes ao interferômetro de Mach-Zehnder podem ser classificadas também em três categorias: a) interferência quântica (questões 12, 14 e 15); b) a noção da medida de trajetória (questão 13); e c) escolha demorada (questão 16).

Em relação à primeira categoria (categoria a), a maioria dos estudantes da amostra (64,3%) parece compreender o fenômeno de interferência quântica no interferômetro de Mach-Zehnder em regime monofotônico. No entanto, as respostas referentes à questão 15 (emissão de um único fóton) mostram que apenas 28,6%

reconheceram a existência de locais proibidos para o fóton (D_2), enquanto que a maioria (57,1%) escolheu a situação prevista para uma partícula clássica.

Na categoria (b), apenas 28,6% reconheceram a noção da medida de trajetória imposto pela presença de D_0 (detector de não-demolição). A maioria dos estudantes da amostra (aproximadamente 57%) dividiu-se entre a totalidade de fótons coletados em D_1 e a grande maioria dos fótons detectados em D_1 . Na última categoria (categoria c), aproximadamente 43% dos estudantes mostraram compreender a escolha demorada, enquanto que 35,7% optaram pelo padrão de interferência quântica (totalidade dos fótons detectados em D_1).

5.1.4 Resultados do teste

Os resultados da aplicação do teste mostram que a maioria dos estudantes optou pelas respostas corretas em quase todo o teste, com exceção das questões 03, 10, 13 e 15 (ver tabela na seção anterior). Não consideramos, no entanto, que esse seja um resultado satisfatório para um grupo de futuros professores. Acreditamos que as questões referentes ao efeito fotoelétrico deveriam ser mais familiares aos estudantes, pois o tema, além de ser abordado na disciplina Física do Século XX – A, é tradicionalmente exigido nas provas de física do concurso vestibular da UFRGS. Com relação aos demais experimentos, é provável que os estudantes jamais tenham discutido em aula o experimento de dupla fenda de modo a abordar os aspectos mais fundamentais da FQ, tais como interferência com elétrons, interferência para fótons únicos (regime monofotônico), superposição de estados, medidas de trajetória, entre outros. Muitos, provavelmente, nem sequer conheciam o aparato experimental de Mach-Zehnder, apesar de se tratar de um experimento mais moderno e crucial na ilustração do comportamento quântico dos objetos microscópicos.

Esse resultado parece ser o reflexo direto da abordagem tradicional nas disciplinas introdutórias de mecânica quântica, cujo enfoque é demasiadamente centrado nos aspectos históricos, destacando mais as características clássicas dos sistemas do que as quânticas (Greca *et al.*, 2001). Nesta abordagem, há uma forte ênfase no emprego do formalismo como mera ferramenta matemática na resolução

de listas de problemas. A abordagem tradicional, portanto, acaba relegando a um segundo plano a questão crucial de que os objetos quânticos são de uma natureza muito diversa dos objetos clássicos (OSTERMANN e RICCI, 2005).

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DO DISCURSO

A partir da interação discursiva dos licenciandos que participaram da primeira etapa da intervenção didática, proposta nessa investigação, selecionamos alguns trechos dos diálogos e os classificamos segundo quatro categorias. Os trechos dos discursos empregados no segundo encontro foram divididos em mais duas categorias. O critério de seleção das falas dos estudantes foi a relevância do conteúdo dos diálogos para a atividade com o IMZ virtual. As categorias identificadas em cada encontro são apresentadas a seguir.

Primeiro encontro: Caminhos dos feixes do *laser*; Polarização dos feixes do *laser*; Interferência em regime clássico; Interferência em regime quântico.

Segundo encontro: Óptica ondulatória; Física quântica.

No intuito de preservar a contextualização dos enunciados transcritos nesse trabalho, organizamos os diálogos em episódios, cada qual vivenciados por cada grupo. Por entender que as atividades realizadas no segundo encontro são complementares às atividades desenvolvidas na primeira aula no laboratório de informática, optamos por excluir da análise as falas dos alunos A_{10} , A_{11} e A_{12} , devido à ausência dos alunos A_{10} e A_{12} , conforme mencionado no capítulo anterior. A seguir são apresentados os episódios vivenciados pelos alunos A_1 e A_2 , A_3 e A_4 , A_5 e A_6 e A_7 , A_8 e A_9 . As frases sublinhadas sinalizam que o locutor está lendo um enunciado em voz alta. Os erros de português e eventuais ocorrências de linguagem vulgar foram mantidos, para não afetar o contexto e a autenticidade dos diálogos. Para designar a superposição de duas ou mais vozes emitidas simultaneamente,

utilizamos um pequeno espaçamento de linha. Os episódios são apresentados a seguir.

5.2.1 Episódios da dupla A₁ e A₂

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A₁ e A₂, ambos do sexo masculino, licenciandos do curso de Física da UFRGS.

Caminhos dos feixes do laser

Diálogo 1. Os alunos iniciaram lendo os itens 1 e 2 do roteiro exploratório (ver apêndice A). O item 2 solicita que os usuários observem o caminho dos feixes de laser emitidos pela fonte e descrevam o que ocorre com os feixes desde o momento em que ele é emitido da fonte até o instante em que é projetado em cada um dos anteparos, conforme mostra a figura 2. Esse primeiro diálogo tem a duração de 2 minutos e 24 segundos.

01. A₂: Tá... Então...
02. A₁: Cara, eu tenho aqui o cálculo desse negócio. Agora que eu lembrei... Não,
03. não tenho. Era o meu trabalho.
04. A₂: Tá, então aqui. Sai um feixe. Parte refratou, então vamos botar aqui.
05. Vamos... vamos constar aqui fase ... π e aqui... π meio. Tá? É só pra ter
06. uma nomenclatura aqui... Tá. Foi pra lá em π e aqui π meio. Quando chega
07. aqui, esse aqui, esse feixe que vai pro refletor aqui da esquerda, né.
08. A₁: Receptor.
09. A₂: É um receptor, né. Que vem pra cá. Como ele bateu e só refletiu, esse aqui
10. tá em π meio. Esse aqui que vinha em π , como passou também e sofreu
11. blábláblá, vem em π meio também... Construtiva. Por isso que vem pra cá.
12. A₁: Hu, hum.
13. A₂: Esse outro que vem em π meio, quando ele passa pra lá, π de novo. E esse
14. daqui tá na frente é π . Por isso que interfere, é... construtiva, né?
15. Interferência construtiva. E aí eles se somam de novo.
16. A₁: É, mas não são os dois que são construtivas, eu acho.
17. A₂: Pra mim, os dois construtivas. Tanto que chega lá no...
18. A₁: Cara, eu fiz isso aí num trabalho semestre passado, cara. E agora eu não tô
19. lembrando.
20. A₂: Hã? Mas, tá. Vamos nessa primeira idéia. Pode ser assim?
21. A₁: Pode ser. Só deixa eu ver se eu não acho esse negócio aqui. (referindo-se
22. ao caderno). Bah, veio! Eu devo ter jogado fora os rascunhos do trabalho.
23. Bah, tinha exatamente a resposta dessa questão aí.
24. A₂: Hã, acho que serve pra gente mostrar o que a gente sabe! Ou o que não
25. sabe, né.
26. A₁: Eu não tenho certeza. É que tem alguns conceitos de onda pra mim que são
27. ainda meio fora da casinha. É, e não tenho mais aqui, cara. Eu coloquei
28. fora.

29. *A₂: Mas vamos assim, então.*
 30. *A₁: Hu, hum. Tá, o 2...*
 31. *A₂: Então... Pra mim, os dois têm interferência construtiva aqui. Somam-se, aqui vai dar um feixe luminoso (inteligível) e lá também.*

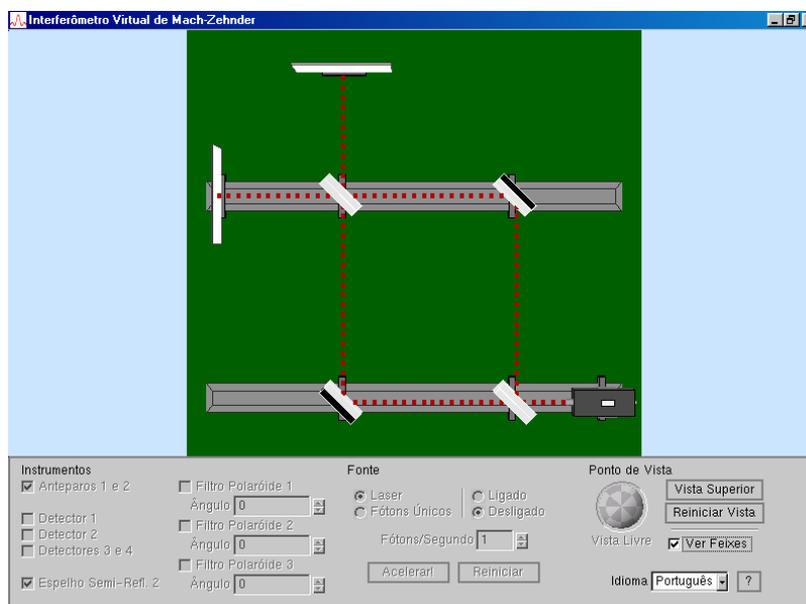


Figura 2. Vista superior dos caminhos dos feixes do *laser*

Logo no início da atividade, A_1 recorre a seu caderno no intuito de encontrar uma resposta adequada para explicar a diferença de fase entre os feixes luminosos que se propagam nos dois braços do interferômetro. A partir das explicações dirigidas a A_1 (linha 4-7, 9-11, 13-15 e 31-32), podemos considerar que A_2 busca exercer o papel do parceiro mais capaz (VYGOTSKY, 1993). O fato de A_2 levar em conta a voz de A_1 nos enunciados “É um receptor, né.” (linha 9) e “Pode ser assim?” (linha 20) mostra que sua abordagem comunicativa pode ser considerada dialógica (MORTIMER e SCOTT, 2002)

Enquanto A_1 tenta simplesmente se livrar da tarefa proposta pelo professor, intenção expressada através dos enunciados “Cara, eu tenho o cálculo desse negócio” (linha 2), “só deixa eu ver se eu não acho esse negócio aqui” (linha 21), A_2 demonstra seu interesse e engajamento na atividade quando diz “hã, acho que serve pra mostrar o que a gente sabe!” (linha 24). Esse último enunciado deixa evidente que A_2 não está interessado em “colar”. Ele não quer encontrar uma resposta pronta para o problema, mas sim resolvê-lo por si mesmo, no intuito de participar na construção de novos significados.

Dialogo 2. No item quatro do roteiro exploratório, os estudantes foram solicitados a retirar o segundo espelho semi-refletor do interferômetro e explicar o padrão luminoso (ou a falta dele) formado nos anteparos, conforme mostra a figura 3. Esse diálogo durou cerca de 2 minutos.

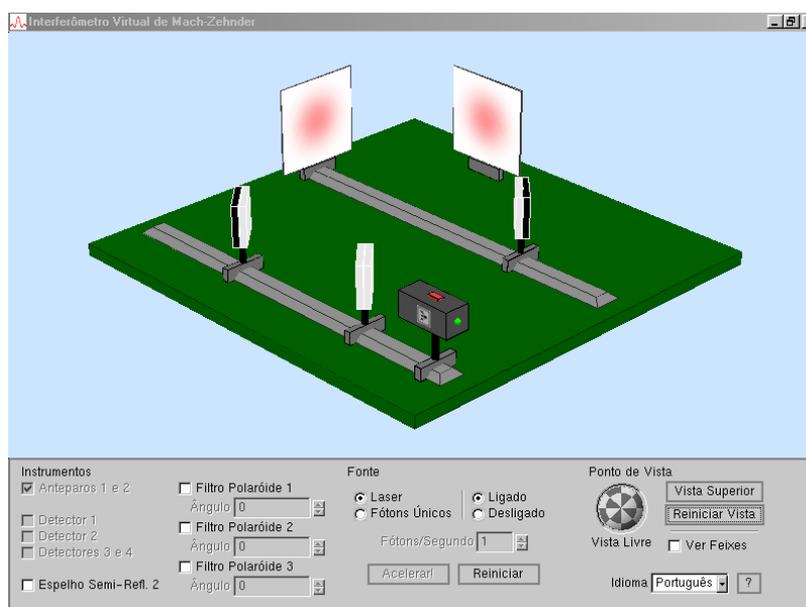


Figura 3. IMZ operando sem o segundo espelho semi-refletor

01. A₁: *A gente tirou um dos negócios, né?* (referindo-se a um semi-espelho)
 02. A₂: *Tirou o quê?*
 03. A₁: *A gente tirou um... Ah, não, não, tá certo, é... Não, saiu um daqui, ó!*
 04. *Lembra que tinha um aqui?*
 05. A₂: *Aaah!*
 06. A₁: *Tinha um igual a esse ali. Foi o que a gente retirou. O que tu tá fazendo*
 07. *aqui? Tu tá pegando um feixe de 'laser'...*
 08. A₂: *Ah, agora sim! Tá interferindo, é isso? Ah, agora sim!*
 09. A₁: *Né. É, tu tem uma parte que refrata, outra que reflete, e*
 10. *os refletores refletem direto pro anteparo.*
 11. A₂: *Sim! Aaah, ok. Por isso que tá dando isso.*
 12. A₁: *Agora tu só tem isso.*
 13. A₂: *Tá, tá, tá, tá. Eu não tinha visto...*
 14. A₁: *Tu tem sinal nos dois anteparos.*
 15. A₂: *Por causa disso que está dando essa dispersão toda.*
 16. A₁: *É.*
 17. A₂: *Tá dando interferência. Aqui ó! Tá, vamos olhar de novo. Aqui a gente sai com*
 18. *o feixe I. Aqui fica π meio. É, sei lá... Né. Aqui ele fica defasado de π meio.*
 19. *Lá ele continua π .*
 20. A₁: *É, mas aqui tu já tem meio comprimento de onda.*
 21. A₂: *De diferença?*
 22. A₁: *É, porque no outro, os meios se juntavam só por diferença de fase.*
 23. A₂: *Depois iria ... Tá, mas aí*
 24. *depois eles... eles passavam pelo espelho semi-refletido, aqui, 2.*
 25. *Então quando eles passavam eles ficavam em fase de novo*
 26. A₁: *Não. Um ficava com... Um tinha um padrão de interferência construtiva e o*
 27. *outro destrutiva.*
 28. A₂: *Por quê?*

29. A₁: *Cara, eu tenho certeza disso! Hehehe... Por que eu já vi essa experiência*
 30. *antes. Vamos fazer o resto que tu vai ver que vai dar isso. Tu vai ver que*
 31. *um anteparo vai tá iluminado e o outro não.*
 32. A₂: *Tá, tudo bem. Então nesse caso...*
 33. A₁: *Aqui como só dividiu os feixes, os dois refletiu o feixe. Então não tem*
 34. *mistério nenhum.*

Esse diálogo demonstra uma disputa entre os componentes da dupla pelo papel de parceiro mais capaz. Ambos tentam exercer essa função, atuando num embate discursivo semelhante às disputas de classes (BAKHTIN, 2006). Na perspectiva do materialismo dialético, as relações sociais estabelecidas em sala de aula devem sustentar tensões análogas àquelas que dinamizam as relações na sociedade (LIMA Jr. *et al*, 2007). No intuito de assumir a função de professor, A₁ organiza sua ação através de uma fala egocêntrica (VYGOTSKY, 1993), exemplificada na fala “O que que tu tá fazendo aqui?” (linhas 6-7). Essa pergunta não é uma dúvida de A₁ acerca do comportamento de A₂; ela não aguarda resposta. Trata-se de um mecanismo utilizado para organizar a própria ação, ao mesmo tempo em que organiza a ação do ouvinte. Esse mecanismo é tipicamente utilizado por professores durante a instrução em sala de aula e pode ser considerado um gênero discursivo (WERTCH, 1993).

A abordagem comunicativa utilizada por A₁ pode ser classificada como interativa e autoritária (MORTIMER e SCOTT, 2002). Esse autoritarismo pode ser exemplificado nos enunciados “agora tu só tem isso” (linha 12), “Não [...] Um tinha um padrão de interferência construtiva e o outro destrutiva” (linhas 26-27) e “Cara, eu tenho certeza disso.” (linha 29). Embora A₁ utilize o conhecimento científico para exercer sua autoridade sobre as explicações das manchas luminosas sobre os anteparos (figura 3), o mesmo não ocorre na sua previsão acerca dos padrões de interferência construtiva no anteparo 1 e de interferência destrutiva no anteparo 2, na presença do segundo espelho semi-refletor. Nessa questão em particular, sua autoridade não está baseada no seu conhecimento prévio sobre física ondulatória, como evidencia a fala “É que tem alguns conceitos de onda pra mim que são ainda meio fora da casinha” (diálogo 1, linhas 26-27). Sua autoridade tem origem numa experiência vivencial do passado, conforme mostra o enunciado “Porque eu já vi essa experiência antes.” (linhas 29-30).

As discussões sobre a ausência do espelho semi-refletor 2 evocaram um mal entendido, por parte de A₂, sobre as razões do padrão de manchas circulares nos

anteparos. O (suposto) entendimento do fenômeno observado evidenciado na fala “Ah, agora sim!” (linha 8) mostra que o enunciado “Tá interferindo, é isso? Ah agora sim!” (linha 8) apresenta-se como uma réplica ao enunciado “Tinha um igual a esse ali. Foi o que a gente tirou” (linha 6). Esse mecanismo de articular à palavra uma contrapalavra torna explícito seu ato de compreensão (BAKHTIN, 2006).

Polarização dos feixes do laser

Diálogo 3. No item 5 do roteiro exploratório, um filtro polaróide foi inserido num dos braços do interferômetro, sob a orientação de 90° em relação à horizontal, conforme mostra a figura 4. Os estudantes tiveram que explicar o sumiço da mancha luminosa sobre o anteparo 2. Esse diálogo teve a duração de 2 minutos e 21 segundos.

01. *A₂: O que você observa em cada um dos anteparos?*
 02. *A₁: Isso aqui é o que mesmo? Que que a gente colocou ali? A gente botou um polaróide, né?*
 03. *A₂: Isso! Um polaróide agora... Bom, que que aconteceu aqui? O que que tá chegando aqui nesse primeiro?*
 04. *A₁: Na realidade, a gente tem só a reflexão desse aqui. Esse aqui já não tá chegando lá, né. Isso aí, provavelmente, porque esse aqui colima, por exemplo, horizontalmente e esse aqui colima verticalmente. Então, some com todos os...*
 05. *A₂: Tá, mas... Tá.*
 06. *A₁: Isso aqui é um polarizador. Ele só, ele só... direciona os raios de luz. Ele só, ele filtra. Né. Ele pega só naquela direção. Provavelmente esse negócio aqui deve fazer no sentido... É também um polaróide. Deve funcionar também como um polaróide.*
 07.
 08.
 09.
 10.
 11.
 12.
 13.
 14.

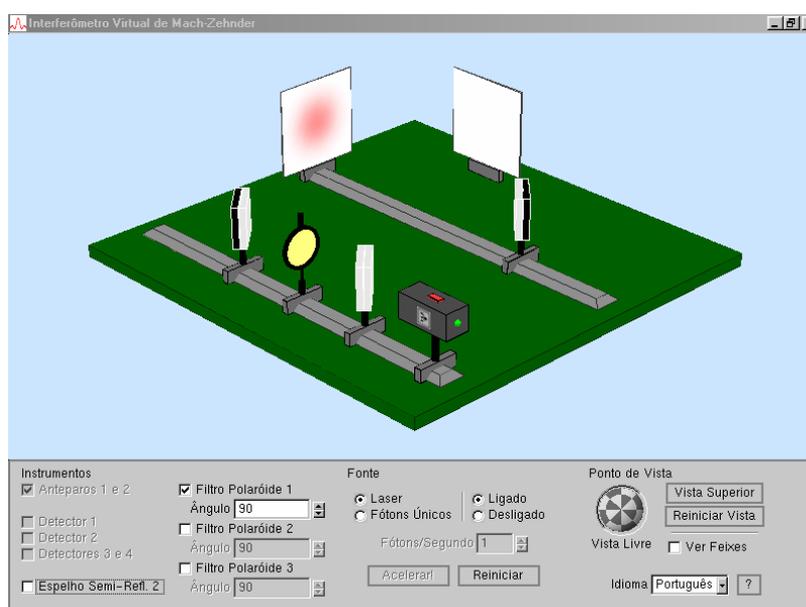


Figura 4. Testando a polarização do feixe de laser

Esse diálogo mostra a organização social que a dupla estabeleceu para dar conta da exploração do IMZ virtual. Enquanto A_2 se responsabiliza pela organização da atividade, através da leitura do roteiro exploratório e da enunciação das perguntas acerca dos eventos observados no *software*, A_1 desempenha a função do parceiro mais capaz assumindo as explicações.

Os enunciados de A_1 podem ser considerados não-interativos e autoritários. Neles, o conhecimento científico é o único considerado e o ato de fala é quase exclusividade de A_1 . A noção de realidade construída por A_1 , manifestada na frase “Na realidade, a gente tem só a reflexão desse aqui” (linha 6), parece ser uma noção impessoal (LIMA Jr. *et al*, 2007). Ele fala *da realidade*, única e verdadeira que, via de regra, tem o mesmo significado para todos os indivíduos daquele grupo social. A_2 , ao contrário, parece construir uma noção pessoal de realidade quando diz “Pra mim, os dois têm interferência construtiva aqui.” (diálogo 1, linha 31), admitindo outras explicações e interpretações do mesmo fenômeno físico.

Outro aspecto importante desse diálogo é a palavra *colima* inserida na frase “Isso aí, provavelmente, porque esse aqui colima, por exemplo, horizontalmente e esse aqui colima verticalmente” (linhas 7-8). Nessa fala, o verbo colimar não significa a redução da abertura angular do feixe de *laser* emitido pela fonte. Nesse contexto, colimar é o mesmo que polarizar. O fato de A_1 utilizar uma palavra errada sob o ponto de vista científico, para designar o fenômeno de polarização, não parece ter prejudicado em nada a comunicação verbal entre os dois indivíduos no diálogo. Isso provavelmente porque as palavras *horizontalmente* e *verticalmente* venham acompanhadas de gestos com as mãos que indicam a direção de oscilação dos campos eletromagnéticos. Nesse sentido, os gestos com as mãos também exercem sua função mediadora na transformação da interação interpessoal em processos intrapessoais (VYGOTSKY, 1993).

Diálogo 4. No item 7 do roteiro exploratório, foram inseridos três polaróides no interferômetro, ajustados em 90° , 45° e 90° respectivamente, conforme mostra a figura 5. O IMZ virtual, no entanto, apresentava um pequeno *bug* de programação no segundo e terceiro polaróide de maneira que o padrão observado nos anteparos não corresponde ao mesmo padrão observado em laboratórios não virtuais. O diálogo durou cerca de 30 segundos.

01. A₁: Tá, agora sumiu tudo!
 02. A₂: Sumiu?
 03. A₁: Sumiu.
 04. A₂: Mas não deveria sumir. Deveria passar parte ainda, né? Só se eu botasse...
 05. Se um tá a 45°, pra eu... Pra não passar mais nada, só se eu botar 135°.
 06. A₁: É, seria exatamente o oposto. É, concordo. Porque aqui não tá sendo filtrado
 07. nada, ele está sendo só refletido. Esse raio é só refletido. Então não tem...
 08. Esse negócio não funciona como polaróide.

Esse pequeno diálogo mostra dois aspectos importantes. Primeiramente, ele dá evidências de um certo grau de acordo entre os indivíduos da dupla, conforme o mostra enunciado “É, concordo.” (linha 6). Esse posicionamento dos participantes da dupla reforça a organização social estabelecida por ambos, demonstrada nos diálogos anteriores (diálogo 3). Outro aspecto importante é que a atividade envolvendo os três polaróides possibilitou que os estudantes desvinculassem a polarização do feixe de *laser* do espelho semi-refletor 1, conforme mostra o enunciado “Esse raio é só refletido. [...] Esse negócio não funciona como polaróide” (linhas 7-8). Essa réplica de A₁ ao seu próprio enunciado passado “Deve funcionar também com um polaróide.” (diálogo 3, linhas 13-14) demonstra, além do caráter mediador do *software*, um diálogo ininterrupto com o roteiro exploratório.

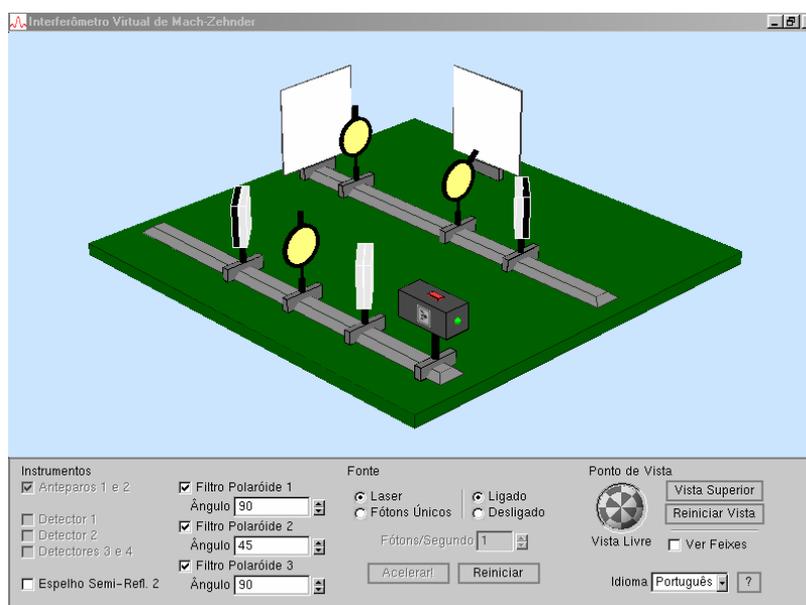


Figura 5. Pequenos *bugs* de programação nos polaróides 2 e 3.

Interferência em regime clássico

Diálogo 5. No item 8 do roteiro, os estudantes retiraram todos os polaróides e recolocaram o segundo espelho semi-refletor. Eles foram solicitados a explicar o padrão de anéis formado sobre os anteparos, conforme mostra a figura 6. O diálogo teve a duração de 2 minutos e 19 segundos.

01. A₂: Ligue a fonte do laser. O que você observa em cada um dos anteparos?
 02. A₁: Ó, que lindo! Hehehe. Qual foi a diferença que a gente fez desse aqui pro
 03. outro, hein?
 04. A₂: Por que obtemos este padrão? Tá, daí eles estão com diferença de fase...
 05. A₁: Tá, mas só um pouquinho. Porque a gente chegou a fazer exatamente isso
 06. aqui.
 07. A₂: Sim!
 08. A₁: No início, né? Mas a gente não viu isso aqui! Ah, a gente tava olhando assim,
 09. né? (referindo-se a opção vista superior)
 10. A₂: hããã. (Pensando)
 11. A₁: Não!
 12. A₂: Não... Espera aí, só um pouquinho! No começo...
 13. A₁: Ah! É que a gente tava... a gente marcou uma das opções, ó! A gente marcou
 14. essa opção aqui. E aí a gente ficou olhando só isso aqui, ó! A gente não
 15. viu o que acontecia no anteparo.
 16. A₂: Não, a gente via. A gente tinha vista superior.
 17. A₁: Não, a gente não via. Só chegava no anteparo, ó. Aí a gente viu por cima, ó.
 18. A gente viu isso aqui no início. Agora a gente desmarcou isso aqui. Então a
 19. gente vai começar a enxergar agora o que que projeta lá.
 20. A₂: Tá. É... Tu falaste que não ia aparecer... num tudo e no outro nada, né? E eu
 21. falei pra ti que ia aparecer nos dois, só que...
 22. A₁: É, apareceu nos dois.

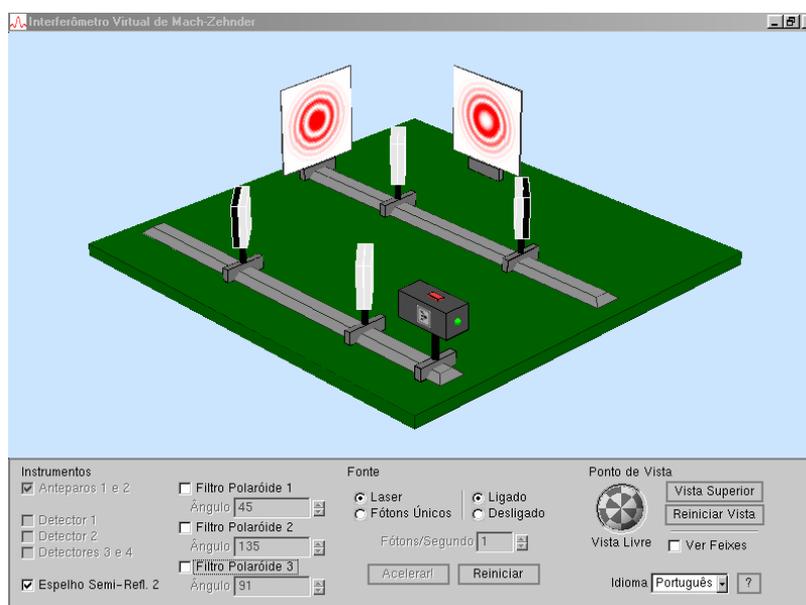


Figura 6. Interferência em regime clássico

Esse diálogo evidencia a importância da fala egocêntrica na organização da ação de A₁. Ele dirige a A₂ uma série de contestações acerca do evento observado

através das falas “Qual foi a diferença que a gente fez desse aqui pro outro, hein?”(linhas 2-3), “Porque a gente chegou a fazer exatamente isso aqui.” (linhas 5-6) e “Mas a gente não viu isso aqui.” (linha 8). Embora essas fossem dúvidas reais de A_1 acerca da atividade em que está imerso, ele engendra, a partir de sua própria fala, uma resposta adequada antes mesmo de dar oportunidade de voz ao seu colega.

Outro aspecto que pode ser destacado nesse diálogo é a contestação da autoridade científica de A_1 por parte de A_2 . A fala “Tu falaste que não ia aparecer... [...] Eu eu falei pra ti que ia aparecer nos dois...” (linhas 20-21) evidenciam a tensão existente nas relações de poder imbricadas na organização social da dupla.

Interferência em regime quântico

Diálogo 6. No item 13 do roteiro exploratório, os estudantes retiraram o segundo espelho semi-refletor e operaram o IMZ virtual em regime quântico, substituindo os anteparos por detectores de fótons, conforme a figura 7. A duração do diálogo foi de 2 minutos e sete segundos.

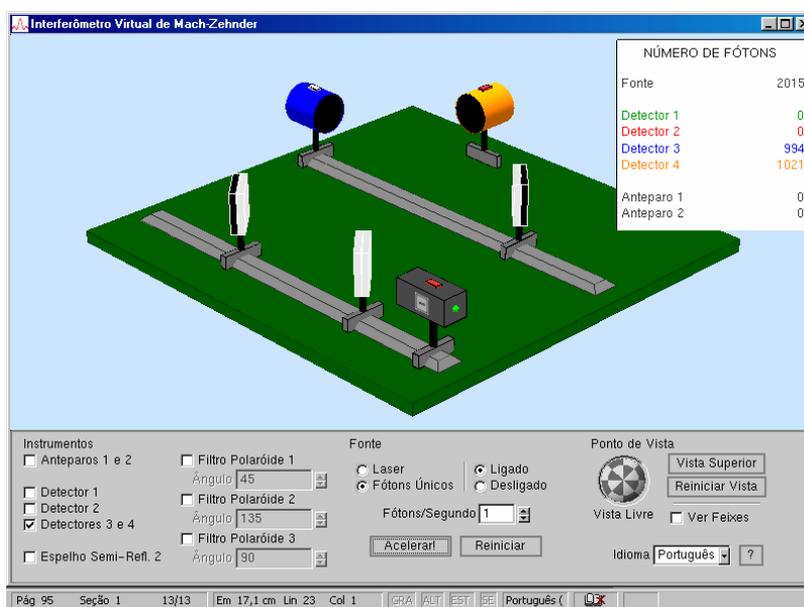


Figura 7. Verificando a indivisibilidade dos fótons.

01. A_2 : Ligue a fonte.
02. A_1 : *Às vezes ele liga o azul, às vezes o amarelo... Ah! Como é só um fóton, ele tem a probabilidade ou de vim... Ou de ser refletido ou de ser refratado.*
03. A_2 : *É, olha lá, ó... Dá pra ver lá em cima, ó... Ó, tá indo pro azul, outra hora pro amarelo, pro azul... Aleatório.*
04. A_1 : *É, aleatório. É aquela probabilidade. É 50% do fóton ir por algum lugar e 50% pro outro.*

08. *A₂: Acompanhe a contagem de fótons emitidos pelo quadro bláblabá e compare*
 09. *com o número de fótons coletados em cada detector. Por que obtemos*
 10. *esse padrão? A gente já disse... Clique no botão acelerar cinco vezes e*
 11. *compare novamente a contagem de fótons emitidos pelo número*
 12. *coletados.*
 13. *A₁: Tem que apertar cinco vezes?*
 14. *A₂: Hã, cinco vezes.*
 15. *A₁: Tá. Continua. Quase 50 %. A diferença é pequena. Vou apertar mais uma*
 16. *vez!*

Novamente, o discurso dos estudantes evidencia aspectos das relações sociais que ambos estabeleceram na execução da tarefa. Nota-se claramente que A₂ organiza a atividade através da leitura do roteiro exploratório, enquanto A₁ se encarrega das explicações, ao mesmo tempo em que opera o IMZ virtual.

O diálogo mostra também que os estudantes estão se apoiando na física ondulatória para compreender aspectos dos fenômenos microscópicos. O enunciado “Ah! Como é só um fóton, ele tem a probabilidade ou [...] de ser refletido ou de ser refratado.” (linha 2-3) sugere uma analogia entre a intensidade do feixe eletromagnético (regime clássico) e o caráter probabilístico inerente à FQ.

Diálogo 7. No Item 15 do roteiro exploratório, os estudantes recolocaram o segundo espelho semi-refletor e mantiveram os detectores 3 e 4, conforme a figura 8. Os alunos tiveram que explicar o padrão de interferência quântica no regime monofotônico. A duração do diálogo foi de 1 minuto e 9 segundos.

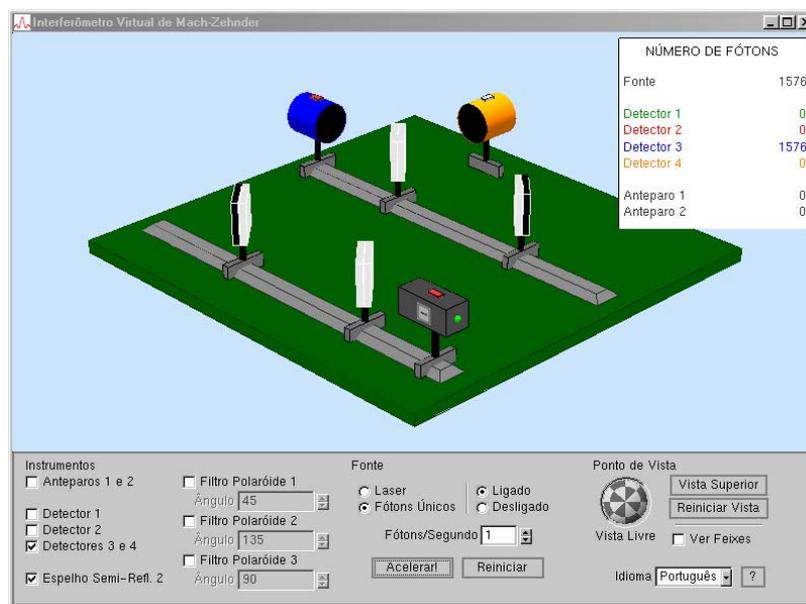


Figura 8. Interferência quântica com detectores

01. A₂: Tá. Desligue a fonte do laser e clique no botão reiniciar. Os instrumentos... Em
 02. instrumentos, marque a caixa de seleção espelho semi-refletido... semi-
 03. refletor 2 e ligue a fonte de 'laser' novamente.
 04. A₁: O que que eu vou te dizer agora... Só vai marcar o azul! Hehehe. Que que eu
 05. te falei? Ele deve mandar apertar no acelerar de novo, não deve?
 06. A₂: Hu, hum. acelerar cinco vezes e compare normal.
 07. A₁: Um, dois, três, quatro, cinco! Eu te falei! Heehehehe.... E agora? Hehehehe.
 08. A₂: Barbaridade! Agora tá ficando ruim.
 09. A₁: Cara, eu te falei. Eu fiz um trabalho sobre isso aí semestre passado.
 10. A₂: Tá.
 11. A₁: Só um detector detecta os negócios...

Esse diálogo mostra claramente uma abordagem autoritária de A₁ na defesa de sua previsão “Só vai marcar o azul!” (linha 04). Esse resultado corrobora previsões anteriores tais como “Um tinha um padrão de interferência construtiva e o outro destrutiva” (diálogo 2, linhas 26-27).

É importante chamar a atenção de que a expressão “E agora?” (linha 07) não é nenhuma repressão ao questionamento de A₂ acerca da autoridade de A₁, demonstrada na fala “Tu falaste que não ia aparecer [...] Eu falei pra ti que ia aparecer nos dois...” (diálogo 5, linhas 20-21). Essa pergunta refere-se ao padrão de interferência observado para fótons únicos no IMZ virtual. Tal expressão (E agora?) é tipicamente utilizada em situações em que o sujeito sente-se incapaz de dar conta de uma tarefa ou quando dispõe de um problema do qual não conhece uma solução imediata. Assim sendo, podemos considerá-la como sendo um gênero discursivo.

Óptica ondulatória

Diálogo 8. No segundo encontro, uma semana depois, os alunos responderam um questionário sobre fenômenos observados na atividade exploratória com o IMZ virtual. A questão 6, em particular, refere-se às interferências observadas no anteparo quando operamos o interferômetro em regime clássico, conforme a figura 6. O diálogo durou 2 minutos e 36 segundos.

01. A₂: Por que os feixes projetados no ponto central do anteparo 1 estão em fase?
 02. A₁: Ah! Tu tem que fazer aquele calculozinho que eu aprendi no semestre
 03. passado, mas que eu não me lembro! Tu tem diferença de π sobre 2 aqui.
 04. Diferença de fase π meio, aí tu reflete... Tem um cálculo que tu faz que tu
 05. chega que aqui dá uma interferência construtiva e aqui dá uma
 06. interferência destrutiva. Aqui eles chegam em fase e aqui eles chegam
 07. com defasagem. Por isso que dá... Como eles chegam em fase, o centro é
 08. pintado.
 09. A₂: Não sei porra nenhuma.
 10. A₁: Vou chama o professor aqui porque eu não lembro disso aí.
 11. A₂: Cláudio!

12. A₁: *Oh professor!*

Esse diálogo mostra que enquanto A2 desiste da tarefa (linha 09), A1 sente capaz de responder a questão, mas não sem a ajuda do professor. Esse pedido de ajuda “Vou chamar o professor porque eu não lembro disso aí.” (linha 10) mostra que para A1 (provavelmente não para A2) a tarefa em questão encontra-se dentro da zona de desenvolvimento proximal (VYGOTSKY, 1993).

Diálogo 9. Na presença do professor, os estudantes solicitam ajuda na compreensão sobre a diferença de caminho óptico dos feixes luminosos que se propagam nos braços do interferômetro. O diálogo durou 1 minuto e 6 segundos.

01. Prof: *Que que acontece aqui? Ele... Quando tá um espelho a 45° com relação a... a*
 02. *incidência é 45° em relação à normal, tu tem um desvio de fase de π sobre*
 03. *2. Tá? Então, tem um deslocamento de π sobre 2 aqui, mais π sobre 2*
 04. *aqui, tem-se... o transmitido não! Então ele chega aqui com, vamos pensar*
 05. *assim, fase π .*
 06. A₁: *Tá.*
 07. Prof: *E aí tu vem pra cá. Esse aqui vai ser transmitido, não sofre deslocamento.*
 08. A₁: *Tá.*
 09. Prof: *Aqui, π sobre 2. Reflete de novo, mais π sobre 2. Qual é a diferença de fase*
 10. *dos dois? Zero. Então eles tão em fase, portanto, construtiva. Tá, agora*
 11. *vamos pensar...*
 12. A₁: *Agora dá pra fazer pelo outro caminho agora.*
 13. Prof: *Agora vamos ver o outro caminho. Só o raio central. Esse aqui...*
 14. A₁: *Refletiu.*
 15. Prof: *Refletiu.*
 16. A₁: *π sobre 2.*
 17. Prof: *Refletiu. π sobre 2 com π sobre dois?*
 18. A₁: *Dá π .*
 19. Prof: *π . Mais outra reflexão.*
 20. A₁: *outro π sobre 2.*
 21. Prof: *3 π sobre 2. Perfeito! Agora vamos ver esse aqui. Zero, π sobre 2...*
 22. A₁: *Só π sobre 2.*
 23. Prof: *Qual é a diferença? 3 pi sobre 2 menos π sobre 2...*
 24. A₁: *É π .*
 25. Prof: *π .*
 26. A₁: *Tem diferença de fase de π .*
 27. Prof: *Então, a diferença de fase de π dá quanto? Destrutiva.*
 28. A₁: *Destrutiva.*

A abordagem comunicativa utilizada pelo professor é nitidamente autoritária, uma vez que o conhecimento científico é o único levado em conta no discurso. No entanto, percebemos que no meio do diálogo ocorre uma mudança brusca na dinâmica dos enunciados transformando a abordagem não-interativa em interativa. Essa mudança é provocada por A₁ quando interrompe o professor e se convida a

participar do diálogo, como mostra o trecho “Agora dá pra fazer pelo outro caminho agora” (linha12).

A partir desse ponto, o padrão de interação desencadeado pelo diálogo entre professor e aluno envolve procedimentos tais como iniciação (I) do professor; resposta (R) do aluno e a ação discursiva do professor (P) que permitem o prosseguimento da fala do aluno (MORTIMER e SCOTT, 2002). Esse diálogo segue o seguinte padrão de interação: I-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P. As perguntas emitidas pelo professor, tais como “ 3π sobre 2 menos π sobre 2?” (linha 21) não são de fato perguntas (no sentido de que o professor não saiba as respostas). Elas exercem o papel de mediador na organização da ação do aluno da mesma maneira que um adulto organiza o discurso de uma criança.

Física quântica

Diálogo 10. A questão 9 do questionário refere-se ao item 13 do roteiro exploratório, no qual foi proposto que os alunos retirassem o segundo espelho semi-refletor do interferômetro. Operando em regime monofotônico, os estudantes substituíram os anteparos do IMZ virtual por detectores (figura 7). Esse diálogo durou 3 minutos e 36 segundos.

01. A₁: *Vamos ligar. Tá, a situação que a gente tem é essa daí.*
02. A₂: *Aquele dia não era o azul que tava mais? Não entendi. Não era o azul que...*
03. *por ter interferência no...*
04. A₁: *Aqui não. Era pra dar a mesma quantidade pros dois!*
05. A₂: *É.. É possível interferir o caminho percorrido pelo fóton? Explique... Não, é*
06. *possível inferir um caminho! É possível inferir um caminho? Não, né?*
07. A₁: *Eu só to tentando entender o que que tá acontecendo aqui porque pra*
08. *mim, era pra ser 50% pra cada um.*
09. A₂: *Mas tá normal. Aleatório, ó.*
10. A₁: *Não! Olha o detector três e quatro... Ah! Agora melhorou um pouco a*
11. *diferença. Ah, tá. Agora voltou. Ah, tá. Agora tá expli... agora tá certinho.*
12. *Tá praticamente 50%.*
13. A₂: *Existe uma probabilidade dele ir pelo caminho A ou caminho B, mas a gente*
14. *não pode falar nada sobre isso.*
15. A₁: *É, só pode dizer que existe a chance, 50% de chance pra cada*
16. *caminho. Só isso.*
17. A₂: *Sim. (escreve na folha)*
18. A₁: *Não, não, mas a gente tá viajando. Aqui ele tá per... olha, lê essa outra*
19. *pergunta. Eu acho que isso aqui não é o que a gente tá respondendo. Se a*
20. *gente pode inferir o caminho, a gente pode! Por que ele ou pode... Se ele é*
21. *detectado pelo azul, obviamente ele seguiu o caminho... esse aqui. Se ele*
22. *é detectado pelo laranja, ele obviamente seguiu esse caminho aqui. Nós*
23. *podemos inferir o caminho percorrido pelo fóton. De acordo com o detector*
24. *que pega ele.*

Esse diálogo mostra a importância da interação discursiva não apenas entre os alunos, mas também entre os alunos e o material de apoio (roteiro exploratório) e entre os alunos e o *software*. As abordagens comunicativas, presentes no início do diálogo, mostraram-se interativas, por ambos participaram do ato de fala, e dialógicas, uma vez viabilizada a interanimação das vozes de ambos nos enunciados na negociação de significados. No final do diálogo, no entanto, a interação discursiva com o roteiro exploratório permitiu que A₁ reavaliasse sua resposta. A partir do enunciado “Olha, lê essa outra pergunta. Eu acho que isso aqui não é o que a gente tá respondendo.” (linhas 18-19) podemos supor que a questão 9b (Apêndice C) de alguma forma organizou a ação de A₁ na resolução da 9a. É curioso notar que a questão 9b não responde a questão anterior. A dinâmica do diálogo sugere que A₁ não teria conseguido responder adequadamente a questão 9a sem antes ter lido a 9b. Esse tipo de interação lingüística, no qual não podemos definir claramente quem respondeu a questão, parece ser um exemplo do que Wertch chamou de *cognição socialmente distribuída* (1993, p. 45).

Diálogo 11. A questão 11 refere-se ao item 15 do roteiro exploratório (ver apêndice B). Os estudantes responderam sobre uma questão referente à interferência quântica, na qual o IMZ virtual opera com os detectores 3 e 4, na presença do segundo espelho semi-refletor 2 (figura 8). Esse episódio teve a duração de cerca de 1 minuto.

01. A₁: Tá, agora a gente botou o semi-espelho. E.. ele te pergunta: em relação ao
02. item quinze, é possível inferir o caminho percorrido pelo fóton? Agora só
03. quem detecta fóton é o azul.
04. A₂: Sim, porque...
05. A₁: Porque ele detecta a interferência construtiva!
06. A₂: Isso. Por ser colimado ali.
07. A₁: É. Eu acho que ele pode continuar inferindo o caminho do fóton. Ou não?
08. A₂: Mas peraí!
09. A₁: Tu já notou que toda vez que ela pisca, pisca só o azul?
10. A₂: Pois é, mas todos os fótons. Se eles só...
11. A₁: Sim, todos vão só pro azul. Mas tu pode inferir qual é o caminho que o fóton
12. tá fazendo pra chegar no azul?
13. A₂: Não.
14. A₁: Tu só sabe que ele chega no azul. Ele pode vir por aqui, como pode vir por
15. aqui.
16. A₂: Concordo.

Esse diálogo mostra uma mudança sutil na organização da ação de A₁ enquanto ele resolve a tarefa proposta para o grupo. Inicialmente, algumas

perguntas e afirmações, tais como “agora só quem detecta fótons é o azul.” (linhas 2-3), “Ou não?” (linha 7) e “Tu já notou que toda vez que ele pisca, pisca só o azul?” (linha 9), são dirigidas a A_2 . Esses enunciados desencadeiam uma série de possíveis respostas, possíveis réplicas no diálogo. Embora seus enunciados sejam todos dirigidos a A_2 , A_1 não aguarda as respostas. Trata-se novamente de uma fala egocêntrica, de um complexo sonoro emitido no intuito de organizar a própria ação.

É possível, no entanto, observar as diferentes intenções manifestadas nas perguntas “Eu acho que ele pode continuar inferindo o caminho do fóton. Ou não?” (linha 7) e “Mas tu pode inferir qual é o caminho que o fóton tá fazendo pra chegar no azul? (linhas 11-12). O primeiro enunciado é de fato uma pergunta, no sentido de que A_1 não sabe ainda a resposta. Ele a pronuncia em voz alta para utilizá-la como fala egocêntrica. No caso do segundo enunciado, A_1 já sabe a resposta; a pergunta é retórica. Ela serve para organizar a ação de A_2 , exercendo sua função mediadora. A partir desse instante, A_1 transforma sua fala egocêntrica em uma fala retórica que organiza a ação do colega, exercendo sua função de parceiro mais capaz.

5.2.2 Episódios da dupla A_3 e A_4

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A_3 e A_4 , ambos do sexo masculino, licenciandos do curso de Física da UFRGS.

Caminhos dos feixes do laser

Diálogo 12. Ao iniciar o programa IMZ virtual, os estudantes interagiram com o *software* antes mesmo de receber o roteiro exploratório. Quando iniciaram as atividades, os estudantes partiram direto para o item 4 (Apêndice B), no qual foram solicitados a retirar o segundo espelho semi-refletor do interferômetro (figura 3). O diálogo teve a duração de 1 minuto e 16 segundos.

01. A_4 : Não vai, não vai ter... Vai ficar esse... essa figura aqui porque não vai
02. ter padrão de interferência porque tu não tem diferença de caminho
03. óptico, né?
04. A_3 : É. Exatamente.
05. A_4 : Né. Qual que interferia? Era esse... com esse aqui que interferiam, né?
06. Tinha diferença de caminho óptico.

07. A₃: *Tinha... (tom de desconfiança)*
 08. A₄: *Né? Esse aqui não tem. Então, fica isso aí.*
 09. A₃: *Mas aonde é que taria no outro lá a diferença de caminho óptico? Eu não lembro direito desse conceito.*
 10.
 11. A₄: *Vinha aqui e batia aqui, lembra?*
 12. A₃: *Beleza!*
 13. A₄: *Aí vinha um outro que vinha aqui, batia aqui, batia aqui e vinha pra cá.*
 14. A₃: *Aaah, perfeito.*
 15. A₄: *Eram dois raios.*
 16. A₃: *Perfeito! Esse...*
 17. A₄: *Esse aqui é esse tamanho mais esse aqui mais esse aqui mais esse aqui.*
 18.
 19. A₃: *Ah, sim.*
 20. A₄: *Tá, mas esse aqui tinha... Esse daqui tinha... Duas reflexões... Na real, tinha três reflexões esse aqui, lembra?*
 21.
 22. A₃: *Ah! Sim, sim.*
 23. A₄: *E esse aqui tinha uma transmissão... Tinha duas transmissões e uma reflexão.*
 24.
 25. A₃: *Certo.*
 26. A₄: *E cada transmissão, lembra, dava uma diferença de fase de?*
 27. A₃: *Um quarto ou um meio de caminho óptico. Era um quarto eu acho.*
 28. A₄: *Cara, eu precisava de um caderno pra lembrar.*

O diálogo mostra claramente uma organização entre os componentes da dupla durante a atividade. A₄ assume para si a função do parceiro mais capaz, utilizando uma abordagem autoritária, porém interativa. É importante chamar a atenção para o fato de que o enunciado “Qual que interferia?” (linha 5) é uma pergunta retórica, utilizada para organizar a ação de A₃, diferentemente do enunciado “Mas aonde que taria no outro lá a diferença de caminho óptico?” (linha 9) que sinaliza uma dúvida.

Excluindo-se a pergunta (linha 5) e o palpite (linha 27) emitidos por A₃ durante seus momentos de fala, sua contribuição no diálogo limita-se a compreensão dos enunciados emitidos por A₄. Expressões como “Exatamente” (linha 4), “Beleza!” (linha 12), “Perfeito.” (linha 16), “Sim, sim.” (linha 19) e “Certo.” (linha 25) não são avaliações dos enunciados de A₃, mas sim uma contrapalavra emitida durante o processo de compreensão. Outro aspecto importante a ser destacado desse diálogo refere-se ao enunciado “Cara, eu precisava de um caderno pra lembrar” (linha 28). Essa fala deixa evidente o caráter mediador dos instrumentos utilizados na sala de aula. O contexto do diálogo indica que A₄ não estava atrás de um caderno para *colar*. Ele precisava utilizar instrumentos (lápiz, caderno) e signos (letras, números, símbolos matemáticos) para conseguir realizar a tarefa.

Polarização dos feixes do laser

Diálogo 13. No item 5 do roteiro exploratório, os estudantes colocaram um filtro polaróide num dos braços do interferômetro sob o ângulo de 90° em relação à horizontal, ainda na ausência do segundo espelho semi-refletor (figura 4). O diálogo teve a duração de 2 minutos e 30 segundos.

01. A₃: *Só um funciona. Nada acontece.*
02. A₄: *Por que obtemos esse padrão?*
03. A₃: *Porque ele corta o outro feixe, né!*
04. A₄: *Tá, vamos ver aqui ó. Esse aqui.*
05. A₃: *Esse filtro polaró... Polaróide, he. Eu acho que ele te permite passar um pouco*
06. *de luz. Regula a quantidade de fótons que passa. Ou a quantidade...*
07. *intensidade de luz que deve passar, né. E ali em 90° tá fechado.*
08. A₄: *É, porque o... a luz do 'laser' é polarizada, né?*
09. A₃: *É.*

Podemos notar nesse diálogo uma rápida inversão dos papéis desempenhados por cada componente da dupla. Essa inversão permitiu que A₃ assumisse momentaneamente a função de parceiro mais capaz. Apesar de se tratar de um diálogo curto, a abordagem comunicativa adotada por A₃ sugere uma abertura maior para a interanimação das vozes, como pode ser observado durante a parte final do diálogo.

Diálogo 14. No item 7 do roteiro, os estudantes identificaram um *bug* de programação do *software* no uso dos filtros polaróides (figura 5). O diálogo teve a duração de 1 minuto e 38 segundos.

01. A₄: *Bom, vamos pra 7. Bota o polaróide 3. Bota... opa, aqui tá? Quanto era pra*
02. *botar aqui? Aqui era 45, né? Aqui em boto quanto? 90° ? E é nós! E morre*
03. *tudo lá... Sim! Mas esse é outro 'bug' não é?*
04. A₃: *Deixa eu ver. Tu tá fazendo o 3 ali?*
05. A₄: *Sim. Aqui ele ia matar a metade, né? Mas daí ele ia tá polarizado nesse*
06. *sentido aqui, não é? Depois de passar por esse polaróide.*
07. A₃: *Éééé.*
08. A₄: *la tá assim, né?*
09. A₃: *Hu, hum.*
10. A₄: *Aí ele ia chegar aqui... assim... e ia passar a metade lá. Então aqui tinha que*
11. *passar... metade da metade? É isso? É isso? Metade passa aqui e*
12. *metade passa aqui.*
13. A₃: *Tá, mas aqui ele é refletido, certo? Se ele é refletido, então daí dá π meios.*
14. A₄: *Sim.*
15. A₃: *Diferente. E aí, ele ia refletir de novo. Dá mais π meios. É um π .*
16. A₄: *Tá, mais não tem nada a ver a fase com a polarização, com o sentido de*
17. *polarização.*
18. A₃: *Tá certo. com certeza. Tô trocando as bolas.*

Esse diálogo demonstra uma série de perguntas retóricas utilizadas por A₄ para organizar a ação de A₃, tais como “Mas esse é outro *bug*, não é?” (linha 3) e “la tá assim, né?” (linha 8). O mesmo ocorre com A₃ no enunciado “Tá, mas aqui ele é refletido, certo?” (linha 13). O aspecto mais importante a ser destacado nesse diálogo diz respeito ao enunciado “Mas daí ele ia tá polarizado nesse sentido aqui, não é?” (linhas 5-6). A palavra ‘aqui’ não se refere a nenhuma figura na tela do computador, nem a algum lugar específico da mesa ou da sala de aula; ela refere-se ao gesto. Os alunos utilizam suas mãos para desenhar no ar o sentido de polarização de uma onda eletromagnética, demonstrando que a fala, apesar de ser a forma mais fundamental do signo ideológico, não é a única.

Interferência em regime clássico

Diálogo 15. No item 8 do roteiro exploratório, os estudantes retiraram todos os polaróides e recolocaram o segundo espelho semi-refletor, conforme a figura 6. O diálogo durou cerca de 45 segundos.

01. A₄: Tá, agora vamos fazer o que ele manda aqui. Arraste o MOUSE até a
 02. fonte do ‘laser’ e clique o botão verde desliga... Ok, desliguei. Retire os
 03. polaróides... Ok. Tá, recoloque o segundo...Ok. Tá, agora tu liga... Tá, é o
 04. que eu imaginei! ... Tá isso é por causa da diferença de caminho óptico:
 05. pá, pá. Não é? Ali, ó. Ótimo.

Esse monólogo é o resultado da interação discursiva entre o A₄ e o roteiro exploratório. A fala egocêntrica, bastante evidente nesse diálogo e encarnada de maneira mais sutil no diálogo 14, parece desempenhar um papel decisivo na resolução da tarefa. O discurso autoritário emitido por A₄ dispensou qualquer participação de A₃ no diálogo.

Diálogo 16. No item 11 do roteiro, os filtros polaróides 1 e 2 são colocados no interferômetro orientados perpendicularmente entre si, conforme mostra a figura 9. Os alunos tiveram que explicar a razão pela qual o padrão de anéis, antes projetado sobre os anteparos, desaparece. O diálogo durou 2 minutos e 49 segundos.

01. A₄: 135 no 2. Ó, aqui é mesma coisa, né? Aqui ó. 45 ou 135 é a mesma merda.
 02. Há... Não!? Caiu a casa! Há... porra! Não é a mesma coisa, cara.
 03. Hehehe. Tá, e agora?
 04. A₃: Fodeu... E que item a gente tá?
 05. A₄: No onze. Ó, Alex!

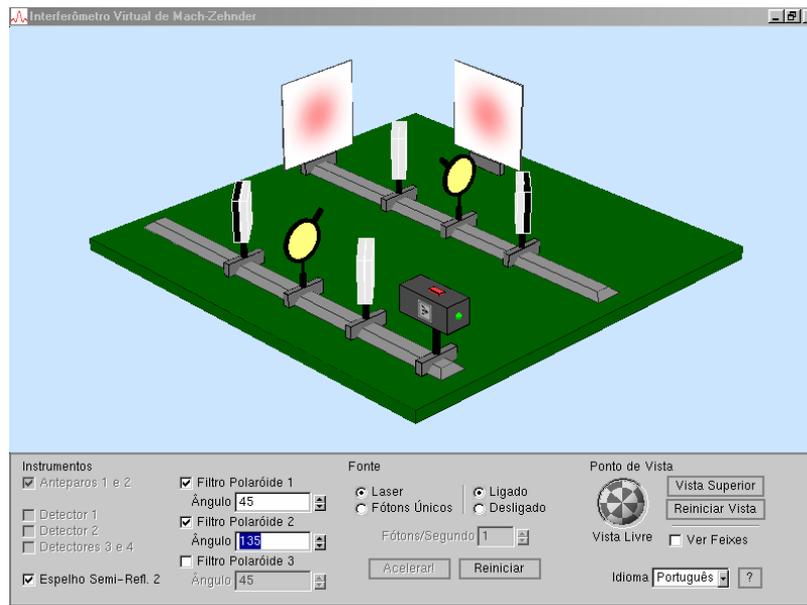


Figura 9. Filtros polaróides em oposição angular.

Podemos observar nesse diálogo novamente a presença do gênero discursivo “E agora?” (linha 3) apontado na seção anterior. Essa regularidade entre as situações específicas e os gêneros discursivos utilizados reforça a noção de caixa de ferramentas proposta por James Wertch (1993, p. 126). O fato de ambos alunos desistirem da tarefa pode ser um indício de que esse item do roteiro exploratório estivesse além da zona de desenvolvimento proximal.

Diálogo 17. Os alunos solicitaram ajuda ao pesquisador (autor do presente trabalho) para resolver o item 11 do roteiro. Esse diálogo durou 1 minuto e 27 segundos.

01. A₄: Não sei responder, hehehe.
02. Pesq: Tá, mas tem que tentar entender... A partir dos polaróides, qual vai ser a polarização agora do 'laser'? Qual a polarização do feixe que sai da fonte?
03. A₄: É..
05. A₃: Horizontal.
06. A₄: Horizontal.
07. Pesq: Isso! Se ele entrar vertical...
08. A₃: Morre.
09. A₄: Para.
10. Pesq: Pois é, então aqui ele tá saindo...
11. A₄: Agora ele vai tá aqui e esse aqui vai tá no outro sentido.
12. Pesq: Eles vão tá...
13. A₄: Perpendiculares... Sim, aí não pode..
14. Pesq: Aí não pode, porque o que que é interferência, né? Nada mais é do que superposição de duas ondas, né?
15. A₃: Certo.

17. Pesq: *Então elas precisam estar... pelo menos uma componente delas tem que*
 18. *estar na mesma direção pra que elas possam se sobrepor e criar um pico*
 19. *maior, ou se for o caso de uma crista e um vale...*
 20. A₄: *Claro, claro. Se elas tão perpendiculares vão passar direto e não interferem.*
 21. Pesq: *É, aí não tem como se sobrepor.*
 22. A₄: *É, faz todo sentido. Muito obrigado.*

Esse diálogo é marcado por uma série de perguntas retóricas e intervenções curtas, por parte do pesquisador, que cumprem a função de organizar a ação dos estudantes. Observamos, entre as linhas 03 e 13, um padrão de interação I-R-P-R-P-R-P. A abordagem comunicativa adotada pelo pesquisador pode ser considerada autoritária, por levar em conta somente o conhecimento científico, e interativa, pois é possível ouvir a interanimação de pelo menos três vozes.

É notável o uso de uma contra-palavra no processo de compreensão evidenciado no enunciado “Se eles estão perpendiculares, vão passar direto e não interferem” (linha 20). Esse enunciado não refere-se a expressão “claro, claro.” (linha 20), mas sim ao enunciado “Sim, aí não pode” (linha 13) emitido anteriormente no diálogo. Outro aspecto notável é o uso de gestos como mediador da ação. O enunciado “Agora ele vai tá aqui e esse aqui vai tá no outro sentido.” (linha 11) mostra novamente o uso das mãos para desenhar no ar as direções de propagação da onda eletromagnética. Esse fato reforça a idéia de que o signo vivo e dinâmico não tem encarnação física na palavra escrita e oral somente, mas também nos gestos.

Interferência em regime quântico

Diálogo 18. No item 13 do roteiro exploratório, o segundo espelho é retirado do interferômetro e os anteparos são substituídos por detectores, conforme a figura 7. Esse diálogo durou 37 segundos.

01. A₄: *Ligue a fonte. O que observa? Putz. Droga, apertei coisa errada. Tá, vai um*
 02. *pra cada detector.*
 03. A₃: *Não.*
 04. A₄: *Como não?*
 05. A₃: *Tão indo muito mais pro detector três. Olha ali, ó. Olha o numerozinho do*
 06. *detector.*
 07. A₄: *Tá, mas tá errado... Ah! Tá lá. Agora a coisa tá ficando linda. Tem que ser*
 08. *igual.*
 09. A₃: *Ah, é que de repente é a única... é a coisa quântica.*
 10. A₄: *Sim, sim, sim.*
 11. A₃: *A probabilidade...*
 12. A₄: *Sim, sim, sim...*
 13. A₃: *Põe ali.*

14. A₄: *Vou botar, ó: acelerar... Já fica mais parecido.*

Nesse diálogo, há uma maior interanimação de vozes, o que caracteriza a abordagem comunicativa dos participantes como sendo interativa. Podemos perceber através do enunciado “Tá, mas tá errado” (linha 7) que A₄ ainda preserva sua função de parceiro mais capaz, impondo sua autoridade científica, apesar de uma aparente contradição evidenciada pelos eventos observados no IMZ virtual.

Diálogo 19. No item 15 do roteiro, os estudantes recolocaram o segundo espelho semi-refletor no interferômetro, operando-o em regime quântico, conforme a figura 8. O diálogo durou cerca de 45 segundos.

01. A₄: *Em instrumentos tu bota o segundo semi-espelho... e ligue a fonte*
 02. *novamente. O que se observe em cada um deles? Tá, agora o que eu*
 03. *imaginei, ó. Esse aqui tá bem no centro, né?*
 04. A₃: *Hu, hum.*
 05. A₄: *Ele só tá coletando os fótons que vão bem no centro do anteparo. Então vai*
 06. *todos pra esse aqui agora. Por causa da interferência. Essa figura de*
 07. *interferência que vai ter na...*
 08. A₃: *Aaah.*
 09. A₄: *Não é?*
 10. A₃: *Hu, hum.*
 11. A₄: *Sacou?*
 12. A₃: *Sim, sim, sim.*

Esse diálogo é mais uma evidência do papel de parceiro mais capaz desempenhado por A₄. Essa função é exercida mediante uma abordagem autoritária e não-interativa. Os enunciados emitidos por A₄, expostos nas linhas 5 e 6, sugerem uma apropriação adequada do discurso científico, no qual o estudante imprime seu acento para convencer, através de seu argumento, seu colega.

Diálogo 20. No item referente à polarização quântica (item 17 do roteiro exploratório), os estudantes colocaram um filtro polaróide ajustado a 45°, conforme a figura 10. O diálogo teve a duração de 1 minuto e 26 segundos.

01. A₄: *Ó, tu vê o padrão de interferência igual, só que mais fraco, né?*
 02. A₃: *Hu, hum.*
 03. A₄: *Não é? É o padrão de interferência mais fraco. Por que? Porque aqui ele vai*
 04. *polarizar assim, e aquele lá... Na real só vai diminuir a intensidade.*
 05. A₃: *É.*
 06. A₄: *A questão é que tu vai ter uma componente que não vai ser perpendicular ao*
 07. *campo, né?*
 08. A₃: *Hu, hum.*

09. A₄: Então tu vai ter, na real, elétrons por todos os cantos aqui, não é?
 10. A₃: hããã...
 11. A₄: Por que a componente que é perpendicular.. tu vai.. Na real, esse aqui vai tá polarizado assim, não é?
 12. A₃: Perfeito. Hu, hum..
 14. A₄: Tá? Ele vai bater aqui e esse aqui vai tá polarizado horizontalmente, não é?
 15. A₃: Hu, hum..
 16. A₄: Então tu vai ter uma componente que vai ser perpendicular.
 17. A₄: Isso.
 18. A₄: Que é esse aqui?
 19. A₃: Hu, hum..
 20. A₄: E outra componente que não é perpendicular.
 21. A₃: Certo, certo.
 22. A₄: Essa perpendicular interfere. A outra não.
 23. A₃: É.
 24. A₄: Por isso que tu vai ter elétrons por tudo que é canto aqui. Fótons, quer dizer...
 25. É isso?
 26. A₃: Mas, não. Mas ali não parece que está em todos os cantos. Parece que tem um padrão ali.
 27. A₄: Pois é, então eu vou perguntar pro Cláudio...

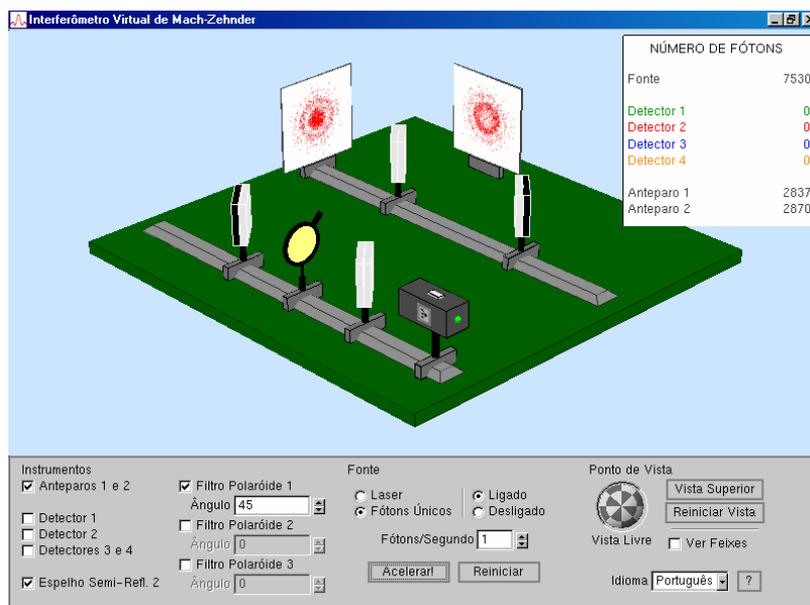


Figura 10. Polarização quântica.

Nesse diálogo podemos perceber claramente a importância dos gestos, os desenhos feitos no ar com as mãos para explicar a direção de polarização dos fótons. Esse mecanismo pode ser observado em vários enunciados, tais como “Porque ele vai polarizar assim, e aquele lá...” (linhas 3-4) e “Na real, esse aqui vai tá polarizado assim, não é?” (linhas 11-12). Embora a iniciação tenha sido feita pelo próprio A₄, o padrão de interação pode ser determinado por I-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P-R-P (linhas 3-25).

Óptica ondulatória

Diálogo 21. No segundo encontro, os estudantes tiveram que responder uma lista de questões sobre os diferentes fenômenos observados no IMZ virtual. No item 8, os alunos responderam duas questões sobre o item 12 do roteiro exploratório, referente à interferência luminosa com polaróides, conforme mostra a figura 11. O diálogo teve a duração de 1 minuto e 43 segundos.

01. A₃: Ele dá o padrão de interferência porque os fótons que incidem naquele
02. anteparo são todos orientados por aquele polaróide agora.
03. A₄: Sim.
04. A₃: Orientados verticalmente.
05. A₄: Sim. Não, porque daí tu vai ter uma componente, né, já...
06. A₃: Não, tu vai ter aqui assim, ó. Tu vai ter 35... é... 135 num e 45 no outro, né.
07. A₄: Vamos colocar... Por que tu volta...
08. A₃: Só que daí sai só metade desses caras aí...
09. A₄: Eu vou escrever assim, ó: porque tu volta a ter uma... Porque o ângulo, o
10. ângulo... Vou botar assim, ó: Porque o ângulo entre os sentidos de
11. propagação dos dois feixes volta a ser menor que 90°, o que possibilita... o
12. que novamente possibilita a interferência. Que tu acha?
13. A₃: Não. Eu acho que tu coloca que o polaróide, tando em 90°, faz com que os
14. dois feixes fiquem com o mesmo sentido de polarização, permitindo que
15. eles interfiram.
16. A₄: É verdade! Claro, claro, claro. Os dois vão ter o mesmo sentido. Agora que eu
17. me toquei.

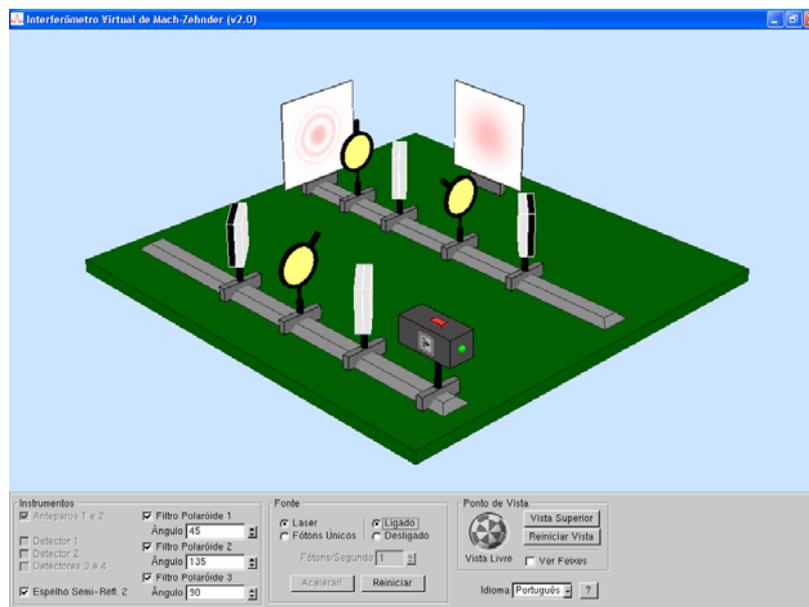


Figura 11. Recuperação do padrão de anéis.

Esse diálogo mostra uma reorganização das funções de cada integrante da dupla na resolução da atividade. Enquanto A₃ exerce agora o papel de parceiro mais capaz, A₄ organiza a ação da atividade como um todo, respondendo a lista de

questões. É possível perceber no decorrer do diálogo as tensões entre os diferentes posicionamentos acerca do fenômeno observado no interferômetro. Essas tensões assemelham-se às relações e disputas sociais.

O enunciado “Os dois vão ter o mesmo sentido” (linha16) sugere uma compreensão adequada do discurso autoritário de A₃. Essa contra-palavra ao enunciado de A₃ reforça a noção bakhtiniana de que a compreensão está para o enunciado assim como uma réplica está para a outra no diálogo (2006, p. 137).

Física quântica

Diálogo 22. O item 9 da lista de questões (Apêndice C), referente ao item 13 do roteiro exploratório, explora o uso do IMZ virtual em regime quântico com os detectores nos lugares dos anteparos e sem o uso do segundo espelho semi-refletor (figura 7). O diálogo teve a duração de 1 minuto e 43 segundos.

01. A₄: É possível inferir o caminho percorrido pelos fótons? Explique.
02. A₃: Não. Hããã...
03. A₄: Mas eu acho que nesse caso sim, cara. O que atingir esse detector aqui só
04. pode ter passado por esse daqui! O que atingiu o outro só pode ter
05. passado por aqui. Não pode ter feito isso daqui: pá, pá, pá pum. Sacou?
06. Nesse caso acho que sim. Sim! Não acha?
07. A₃: Acho que quanticamente... Não, quer dizer... Veja bem. Por aqui, sim. Só que
08. quanticamente, né... Hããã, ali tem um estado de superposição. Ele passa
09. por aquele primeiro espelho, semi-espelho ali. Ele tem uma probabilidade
10. de 50% de passar por um ou por outro.
11. A₄: Sim, mas isso....
12. A₃: Mas, ele passar por um ou por outro é que tem o colapso da função de onda
13. que faz com que ele escolha um dos caminhos.
14. A₃: É, isso aí. Mas, mas olhando nos detectores tu pode
15. saber qual caminho que ele fez. Então, sim!
16. A₃: Acho que... Vamos perguntar pra ele antes.
17. A₄: Porque... mas... sim, perguntamos. Mas eu acho que sim, porque se ele
18. atingiu esse detector, só pode ter passado por esse caminho aqui.
19. A₃: Ah, não. É isso.
20. A₄: Então, acho que a resposta é sim.
21. A₃: Mas eu acho que... não é a interpretação quântica.
22. A₄: Se tivesse o segundo semi-espelho, daí a gente não pode saber qual o
23. caminho dele.
24. A₃: Ah, é verdade.
25. A₄: E eu acho que é isso que ele vai querer depois que ele pede pra botar. O item
26. 15 pede pra botar o segundo semi-espelho... Boto isso?
27. A₃: Vamos, vamos só ver o que eles acham... Achei melhor.

Esse diálogo reproduz novamente um debate, uma disputa ideológica entre os oponentes da dupla. Enquanto A₄ se apóia nas evidências observadas no IMZ virtual (linhas 3-5), A₃ dispõe de suas experiências prévias recorrendo a alguns conceitos pertencentes à FQ, tais como *estado de superposição* (linha 8) e *colapso*

da *função de onda* (linha 12). Essa apropriação pode ser interpretada de pelo menos duas maneiras: ou trata-se de um discurso autoritário pautado no conhecimento científico ou trata-se de uma tentativa de assumir a função do parceiro mais capaz, lançando mão de gêneros discursivos específicos de situações envolvendo a FQ. A segunda proposição faz referências à analogia da caixa de ferramentas proposta por Wertch (1993).

Diálogo 23. O item b da mesma questão refere-se à indivisibilidade dos quanta. Os estudantes analisaram o interferômetro no mesmo arranjo descrito no diálogo 22. O diálogo a seguir tem a duração de 1 minuto e 39 segundos.

01. A₃: *Ó, eu acho que não. Acho que ele não é capaz de se dividir.*
02. A₄: *Botar aqui... Haga.*
03. A₃: *Eu acho que ele tem uma...*
04. A₄: *Vou botar aqui, ó: acho que sim!*
05. A₃: *Explica porque.*
06. A₄: *pois no fenômeno... de interferência... em regime monofotônico... a única*
07. *explicação... Na real existem outras explicações, né. Mas eu não sei as*
08. *outras, então pra mim é a única que existe... Única explicação, vou botar*
09. *aqui, ó: pelo menos pra mim. Hehehe... é o fóton se dividir. Tá, tu acha que*
10. *não por que?*
11. A₃: *Porque eu acho que... Hããã ... Quando ele tá num... passando prum... uma*
12. *coisa assim... que tem 50% pra cada lado, ele fica num estado de*
13. *superposição, né, que faça com que a função de onda...*
13. A₄: *Olha, escreve isso aí que eu não entendo porra nenhuma.*
14. A₃ – *Tá bom.*

Esse diálogo deixa claro que as opiniões dos dois estudantes são levadas em conta ao responder esse item da lista de questões. Essa interanimação de vozes caracteriza esse discurso como interativo e dialógico. No entanto, essa interação não se desenvolve num vácuo cultural, tampouco através de relações harmoniosas entre os componentes da dupla. Sua dinâmica se modifica pela tensão existente nas relações lingüísticas entre os alunos, através do antagonismo dos conceitos onda e partícula. Os enunciados emitidos no diálogo expressam suas interpretações acerca dos fenômenos microscópicos (interpretação ondulatória *versus* interpretação dualista realista).

5.2.3 Episódios da dupla A₅ e A₆

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados pelos estudantes A₅ e A₆, ambos do sexo masculino, licenciandos do curso de Física da UFRGS.

Caminho dos feixes do laser

Diálogo 24. No item 2 do roteiro exploratório, os estudantes marcaram a opção ver feixes no painel de controle do IMZ virtual, conforme mostra a figura 2. Os estudantes foram solicitados a explicar o que ocorre com o feixe desde o momento em que sai da fonte até o instante que o mesmo é projetado sobre os anteparos. O diálogo teve a duração de 1 minuto e 54 segundos.

01. A₅: Ver feixes de 'laser'. Descreva o que ocorre... O que que tá acontecendo?
 02. Chega no primeiro semi-espelho, 50% é refletido, 50% é refratado. Chega
 03. nos espelhos, todos são refletidos e o que acontece no semi-espelho é a
 04. mistura dos dois feixes de luz. 50% é transmitido, 50% é refratado. É só
 05. isso que pede. Aqui não temos dúvidas do que acontece.
 06. A₆: Não.
 07. A₅: Marque a seleção dos feixes... Marcado. Em seguida, clique na opção reiniciar
 08. vista. Ah! Muito bem. Em instrumentos, desmarque a caixa de opção do
 09. semi-espelho 2. Aquilo que a gente tinha feito. Em seguida, na fonte,
 10. aquele botãozinho amarelo, ligue. O que você observa em cada um dos
 11. anteparos? Aquilo que nos tínhamos falado. Uma mancha como se fosse
 12. um ponto de luz.
 13. A₆: Essa é agora uma vista, não a superior.
 14. A₅: É, não.
 15. A₆: Então é mais uma vista. Agora nós vamos ter que observar...
 16. A₅: isso. Então... Isso é aquilo que a gente falou. Reflete
 17. igual. 50% transmitido e reflete. Não interage com mais nada. Mesma coisa
 18. aqui:reflete, reflete e não interage com mais nada. É só luz refletida. Então,
 19. eu acredito que é isso mesmo que a gente tem que dizer. Não tem
 20. interferência, os dois feixes de luz vão se cruzar e não interferem
 21. A₆: É.

Esse diálogo demonstra a organização social estabelecida pela dupla. A₅ assume pra si o papel do parceiro mais capaz e organiza a atividade através do roteiro exploratório, lendo os enunciados e emitindo as explicações. O enunciado “Marcado” (linha 7) sugere que A₅ esteja também controlando o IMZ virtual. O diálogo mostra claramente o domínio da voz de A₅ sobre a de A₆, como se a fala fosse quase que exclusividade daquele e não desse. Essa tensão faz com que A₆ limite-se a pequenas intervenções que causam pouco efeito ao interlocutor. Essa organização desigual assemelha-se às relações sociais de opressão.

A abordagem comunicativa de A₅ é autoritária e não-interativa. Sua fala parece desempenhar uma função mediadora na organização da própria ação (fala

egocêntrica) ao mesmo tempo em que organiza a ação do colega. O enunciado “O que que tá acontecendo?” (linha 1) pode ser entendido como um gênero discursivo específico das situações de instrução.

Polarização dos feixes do laser

Diálogo 25. Na ausência do segundo espelho semi-refletor, os estudantes colocaram um filtro polaróide num dos braços do interferômetro, sob um ângulo de 90° (figura 4), conforme o item 5 do roteiro exploratório. O diálogo durou cerca de 45 segundos.

01. A₅: *Pois bem, polarização dos feixes. Em instrumentos, ligue o filtro polaróide 1.*
02. A₆: *Aqui tu tá vendo que quando o ângulo tá zero, continua tendo os dois.*
03. A₆: *Como é que é?*
04. A₅: *Quando o ângulo aqui é zero, ó.*
05. A₆: *Hu, hum.*
06. A₅: *O ângulo do polaróide. Se é zero, quer dizer que ele tá permitindo passar o*
07. *'laser' igual. Quando eu boto os 90...*
08. A₆: *Muda aqui, tu viu?*
09. A₅: *Isso. Ai então ele bloqueia onde tá o polaróide. Ou seja ele só...*
10. A₆: *Não deixa passar.*
11. A₅: *Não deixa passar. Que esse é o sentido de polarização do feixe. Ele é*
12. *polarizado só nesse sentido... a 90°.*

Nesse diálogo, a abordagem comunicativa de A₅ é autoritária, pois não leva em conta outras vozes que não sejam a científica, porém interativa, pois podemos perceber uma participação maior da fala de A₆. O enunciado “Aqui tu tá vendo ...” (linha 2) mostra que a fala está sendo orientada exclusivamente para A₆, caracterizando um padrão interação tipicamente de instrução. Os enunciados “hu, hum.” (linha 5) e “muda aqui, tu viu?” (linha 8) sugerem que a fala de A₅ e as simulações da IMZ virtual estão mediando a transformação das interações interpessoais em processos intrapessoais (internalização). A contrapalavra emitida por A₆ na frase “não deixa passar” (linha 10) evidencia sua compreensão.

Interferência em regime clássico

Diálogo 26. No item 8 do roteiro exploratório, os estudantes recolocaram o segundo espelho semi-refletor, conforme mostra a figura 6. Os estudantes tiveram que explicar os padrões de anéis formados sobre os anteparos. O diálogo durou cerca de 36 segundos.

01. A₅: Ligue a fonte do 'laser'.
 02. A₆: Qual?
 03. A₅: Em cada um dos anteparos. Que que se observa em cada um dos anteparos?
 04. São os padrões de interferência.
 05. A₆: É.
 06. A₅: Daí, é aquilo que a gente tava vendo.
 07. A₆: Destrutiva e a outra...
 08. A₅: No centro, uma é construtiva e a outra destrutiva.
 09. A₆: Uma é construtiva e a outra destrutiva.
 10. A₅: Aquilo que a gente viu na aula passada. Conforme a diferença de caminho
 11. óptico ou ... a defasagem.

Esse diálogo reproduz o mesmo tipo de organização social estabelecida nos diálogos anteriores (diálogo 24). No entanto, as pequenas intervenções de A₆ parecem exercer um efeito ainda menor na dinâmica dos enunciados de maneira a transformar a fala de A₅ em, essencialmente, egocêntrica.

Diálogo 27. No item 10 do roteiro exploratório, os estudantes colocaram dois filtros polaróides, um em cada braço do interferômetro, orientados perpendicularmente entre si (um 45° e outro a 135°), conforme mostra a figura 9. O diálogo durou 1 minuto e 6 segundos.

01. A₅: Digite 135 no campo de ângulos correspondente ao filtro polaróide 2. 135 e
 02. tecle ENTER. Se é 135, então é 45 pro outro lado. Na, então a gente deve
 03. voltar a ver um padrão de interferência. E não... E não acontece o padrão
 04. de interferência!
 05. A₆: Tu tem uma na... prum sentido, né. Tirando uma prum sentido e uma no
 06. outro. Aqui passa aqui, né. Passa B, A tá passando aqui.
 07. A₅: É, antes... Se eu pensar em
 08. onda, eles não são coplanares. Tá certo, mesmo. Como eles não são
 09. coplanares, não tem interferência construtiva e destrutiva. Eles tão em
 10. ângulos diferentes. Os zeros até pode tá.
 11. A₆: Não vão interferir uma na outra. Tão em planos diferentes
 12. A₅: Não vão interferir. Tão em planos diferentes. É
 13. isso aí mesmo. É verdade.

Assim como no diálogo 26, podemos perceber uma maior participação discursiva de A₆ no diálogo, o que caracteriza a abordagem comunicativa de A₅ como interativa. A palavra 'eu' contida no enunciado "se eu pensar em onda, eles são coplanares" (linha 8-9) sugere uma fala egocêntrica ao invés de uma explicação. Seu enunciado só se torna uma explicação de fato quando seu discurso, antes orientado internamente, desloca-se em direção ao colega, onde passa a ser orientado externamente, conforme mostram as linhas 8-11. A ruptura de um procedimento a outro parece ocorrer no enunciado "Tá certo mesmo." (linha 9). A

contrapalavra emitida por A₆ através do enunciado “Não vão interferir uma na outra. Tão em planos diferentes.” (linha 12) evidencia novamente um mecanismo de compreensão.

Interferência em regime quântico

Diálogo 28. No item 13 do roteiro exploratório, os estudantes substituíram os anteparos por detectores e voltaram a retirar o segundo espelho semi-refletor do interferômetro, conforme a figura 7. O diálogo durou cerca de 2 minutos.

01. A₅: Em instrumentos, marque a caixa de opção detectores 3 e 4. Ah, tu viu que
 02. daí sai os anteparos e entra os detectores.
 03. A₆: O Detector pisca.
 04. A₅: Sim, pra ver os fótons. Pra que lado foi o fóton. É bem provável que era isso.
 05. O que se observa em cada um dos detectores? Ah, e ligue a fonte.
 06. Detector 3 e 4, que é o que a gente tá vendo. O que se observa em cada
 07. um dos detectores? Porque obtemos este padrão? Ó, eles não vão
 08. interferir. É, se eu to emitindo um único fóton... Tu viu que não é igual. Tá
 09. vendo? Aqui aponta quantos tá chegando em cada um deles. Aqui é o total
 10. emitido. Não é proporcional.
 11. A₆: Isso é uma coisa aleatória.
 12. A₅: Não, é aleatório. Porque tu tá vendo, ó. Não existe uma baita diferença, esse
 13. aqui já passou. É aleatório. Mas um...
 14. A₆: É aleatório. 50% de chance de passar ou de refletir.
 15. A₅: Isso... É aleatório. Isso é
 16. verdade. Ou bate aqui e vê lá... Beleza, é aleatório. Beleza.

Esse diálogo é marcado pela participação decisiva de A₆ na construção de significados. Embora coubesse a A₅ a tarefa de explicar, conforme mostram as linhas 4, 7-10 e 12-13, os enunciados “Isso é uma coisa aleatória” (linha 11) e “é aleatório. 50% de chance de passar ou de refletir.” (linha 14) emitidos por A₆ possibilitaram uma reestruturação das explicações elaboradas pelo colega. A incorporação da voz de A₆ na fala de A₅, conforme os enunciados “Não, é aleatório.” (linha 12) e “Beleza, é aleatório” (linha 16), caracteriza uma abordagem comunicativa interativa e dialógica.

Diálogo 29. No item 15 do roteiro exploratório, os estudantes recolocaram o espelho semi-refletor 2 para observar o fenômeno de interferência quântica, conforme a figura 8. O diálogo durou 1 minuto e 30 segundos.

01. A₅: Só aparece um deles. Detector 3 só o que é refletido. Ah, claro. O padrão de
 02. interferência. Se ele vier no centro, aqui não era aonde tinha a... é..
 03. A₆: A construtiva?

04. A₅: *Construtiva... aonde tinha um centro iluminado... aonde tava chegando os*
 05. *fótons... Então aqui eu esperaria realmente ter os fótons.*
 06. A₆: *É um fóton de cada vez, né?*
 07. A₅: *É um fóton de cada vez.*
 08. A₆: *Ele não pode se dividir!*
 09. A₅: *Essa que é a questão da quântica, né.*
 10. A₆: *Então, se ele é um de cada vez, não podia ter ... se é um só, não podia se...*
 11. *não podia ter diferença, né.*
 12. A₅: *É aquela questão. Ele se... como é que é? Ele interfere com ele mesmo*
 13. *depois. Essa que é a questão da quântica. Mas se tu pensar nas manchas,*
 14. *né. No centro, tu vai ter fótons ali mesmo. (Ininteligível). Sempre no 3,*
 15. *sempre no centro do 3.*
 16. A₆: *É.*
 17. A₅: *Se eu pensar assim. E aqui no centro do 4, nada porque ele tá em destrutiva.*
 18. *Agora fica essa questão mesmo. Um único fóton está interagindo com ele*
 19. *mesmo. Atira, ele chega. Então, ele tá interagindo com ele mesmo.*

Esse diálogo se caracteriza por uma mudança brusca de abordagem comunicativa entre os alunos. Essa interação discursiva permitiu a interanimação de vozes necessária para a construção de significados. Ambos estudantes parecem ter percebido o que Richard Feynman chamou de único mistério da mecânica quântica (FEYNMAN *et al.* 1963, p. 1-4). Esse discurso dialógico e interativo pode ser o resultado da falta de domínio de ambos estudantes acerca do conteúdo no diálogo.

Outro aspecto notável é o uso, por parte de A₅, da expressão “Ele interfere com ele mesmo” (linha 12). Essa expressão pode ter vários significados, dependendo da corrente filosófica adotada para interpretar a mecânica quântica. No entanto, o uso do enunciado “Ele se... Como é que é?” (linha 12) sugere mais a apropriação de uma frase tipicamente utilizada em situação de ensino de FQ do que um posicionamento filosófico. Podemos considerar tal expressão como sendo outro gênero discursivo.

Diálogo 30. No item 16 do roteiro exploratório, os estudantes substituíram os detectores pelos anteparos. Eles tiveram de explicar o padrão de anéis para fótons únicos, conforme mostra a figura 12. O diálogo durou 1 minuto e 18 segundos.

01. A₅: *Quando não tinha espelho, que que acontecia? Não tinha 50% de chances de*
 02. *vir por aqui e 50% de chance de sair aqui? É a mesma coisa com o*
 03. *anteparo. Sem esse anteparo não tinha interferência, né. Sem esse*
 04. *espelho. Esse semi-espelho. Agora tem o semi-espelho e tu tem*
 05. *interferência. Como tu tem 50% de chance por aqui e por aqui!*
 06. A₆: *É.*
 07. A₅: *Mais lá um padrão de interferência. Tu sempre vai ter um centro claro. Não sei*
 08. *se tu entendeu.*
 09. A₆: *Não, eu entendi sim. Claro que entendi. Eu só to assim achando isso aí que é*
 10. *um disparo.*

11. A₅: *Sim, fica difícil de entender.*
 12. A₆: *Se for um fóton por disparo, como é que ele interfere?*
 13. A₅: *Hu, hum... É, se tu pensar num como um corpúsculo, tem que ir por algum caminho. Mas na quântica, isso não...*
 14. A₆: *Não vale.*
 16. A₅: *... não quer dizer.*

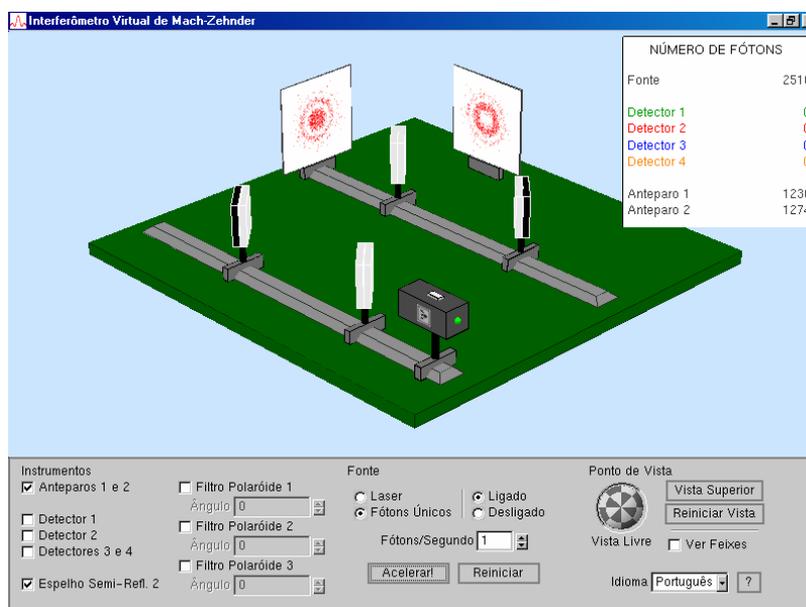


Figura 12. Interferência quântica com anteparos.

Esse diálogo mostra a transição de um discurso retórico e autoritário para sua forma mais dialógica e mais interativa. No início da fala (linhas 1-8), é possível identificar enunciados unidirecionais, no seu formato mais retórico. As perguntas “o que que acontecia?” (linha 1) e “Não tinha 50% de chance de vir por aqui e 50% de chance de sair aqui?” (linhas 1-2) servem para organizar a ação de A₆ enquanto A₅ exerce sua função do parceiro mais capaz. A partir do pronunciamento da palavra *disparo* (linha 10), no entanto, a interanimação de vozes possibilita uma aproximação a um dos mais importantes mistérios da FQ.

Óptica ondulatória

Diálogo 31. No encontro seguinte, os estudantes tiveram que resolver uma lista de questões referentes às atividades com o IMZ virtual. A questão 6 refere-se ao item 8 do roteiro exploratório, no qual os alunos obtiveram o padrão de anéis luminosos projetado nos anteparos (figura 6). O diálogo durou 1 minuto e 40 segundos.

01. A₅: *Por que os feixes projetados no anteparo estão em fase? Aquilo que a gente*
 02. *tem anotado no caderno. Por que que eles tão em fase?*
 03. A₆: *É que... Esse aqui é o anteparo 1?*
 04. A₅: *Isso. Esse aqui é o anteparo 1.*
 05. A₆: *Tá.*
 06. A₅: *Aqui é aquele negócio. A gente só tem a construtiva. Por isso que ele fala*
 07. *(ininteligível).*
 08. A₆: *É, porque...*
 09. A₅: *Tem diferença de caminho óptico devido à reflexões?*
 10. A₆: *Eles... é construtiva. Eles tão em fase. Cada um... cada um deles tem uma...*
 11. *tem uma reflexão. Duas reflexão.*
 12. A₅: *Ah não, é que...*
 13. *É, é isso que...porque a diferença de caminho óptico devido ao caminho*
 14. *percorrido não tem. Então, não faz diferença. Eles tão em fase ainda. E,*
 15. *nas reflexões, pra cada reflexão desses espelhos que estão a 45° a gente*
 16. *tem mudança de fase de π . Só que somando os dois, a diferença dá zero.*
 17. A₆: *É. E aí, em cada transmissão, a espessura é calculada para que não exista*
 18. *mudança de fase.*
 19. A₅: *Sim... Isso aqui é difícil de explicar!*

Esse diálogo mostra uma situação peculiar que ainda não havia sido analisada nesse capítulo. Trata-se de um discurso citado. Na primeira parte do diálogo (linhas 1-11) os estudantes em interação discursiva interanimam suas vozes na tentativa de construir uma resposta adequada à questão. No entanto, esse mecanismo não se mostrou muito útil, fazendo com que A₅ recorresse ao caderno. Essa intenção, demonstrada no enunciado “Aquilo que a gente tem anotado no caderno” (linhas 1-2), pode ser um indício de que essa atividade estava além da zona de desenvolvimento proximal da dupla.

É interessante notar que ao citar o discurso de outrem (anotações de aula), A₅ permitiu misturá-la às suas próprias palavras, impondo seu acento. Esse estilo de citação pode ser classificado como estilo pictórico (Bakhtin, 2006). Cabe chamar a atenção para o fato de que esta citação fez com que A₆ se lembrasse de um detalhe que ele ouviu em uma das aulas anteriores, mas que não havia sido citado em momento algum da atividade. Essa lembrança, “em cada transmissão, a espessura é calculada para que não exista mudança de fase.” (linhas 17-18), pode ser mais um exemplo de cognição socialmente distribuída.

Física quântica

Diálogo 32. O item 11b da lista de questões refere-se ao padrão de interferência para fótons únicos, exibidos no item 15 do roteiro exploratório (figura 8). O diálogo teve a duração de 2 minutos e 53 segundos.

01. A₅: Como você explica o padrão de interferência observado para
 02. fótons únicos? Aquilo do fóton se dividir. Aquilo que o professor tava
 03. dizendo na outra aula, que a função de onda do fóton... Ele chama de
 04. braço da função de onda. Um fóton interfere, né.
 05. A₆: É, a gente pode pensar que classicamente não poderia haver interferência,
 06. mas quanticamente
 07. A₅: Como você explica?
 08. A₆: basicamente não existiria....
 09. A₅: Basicamente não existiria e não há como...
 10. A₆: Obter... haver interferência
 11. A₅: Basicamente não existiria e não há como entender o efeito. Pensando
 12. somente classicamente, né.
 13. A₆: Perfeito.
 14. A₅: Quanticamente, é como se o fóton interagisse com ele mesmo.
 15. A₆: O fóton interfere com ele mesmo.
 16. A₅: Mas devemos considerá-lo como onda
 17. A₆: Hu, hum.

Outro aspecto interessante que não havia sido analisado ainda nesse capítulo é o que Bakhtin define de *ventrilocução* (WERTCH, 1993, p. 78). Esse mecanismo é explicitado no enunciado “a função de onda do fóton” (linha 3).

A abordagem comunicativa de ambos estudantes nesse diálogo pode ser considerada interativa e dialógica. Somente a partir da interanimação de vozes os integrantes da dupla foram capazes construir, passo a passo, a resposta que juntos consideraram ser a mais adequada para a questão.

5.2.4 Episódios do grupo A₇, A₈ e A₉

Os episódios analisados nessa seção foram vivenciados por A₇ e A₈, ambas do sexo feminino, e por A₉, do sexo masculino, estudantes de Licenciatura em Física da UFRGS.

Caminhos dos feixes do laser

Diálogo 33. No item 4 do roteiro exploratório, os alunos retiraram o espelho semi-refletor 2, conforme mostra a figura 3. Os estudantes tiveram que explicar as manchas luminosas projetadas sobre os anteparos. O diálogo durou 2 minutos e 22 segundos.

01. A₈: Em instrumentos, desmarque a caixa de seleção espelho semi-refletor. Tá.
 02. A₇: Em seguida...

03. A₈: Em fonte, centro do painel!...
04. A₇: Marque a opção 'laser'. Tá marcado
05. A₈: 'Laser'. Tá. Arraste o MOUSE até a fonte do 'laser'
06. e clique no botão amarelo. Tá. O que se observa em cada um dos
07. anteparos? Por que obtemos esse padrão?
08. A₇: Porque é 'laser' é pra ser mono, né.
09. A₈: O 'laser' é pra ser mono, mas na realidade ele não é, né.
10. A₇: Sim, mas a gente considera mono quando a gente tá estudando.
11. A₈: Sim, sim. Se ele fosse monocromático, ia acontecer o que a gente via em
12. aula. Num ia ter interferência construtiva, né. E no outro, destrutiva.
13. A₉: Peraí. Eu só não to vendo aquele espelho divisor aqui.
14. A₇: Qual? Ah, o último?
15. A₉: O último.
16. A₇: Ah, imagina, né. Ai, falta de imaginação.
17. A₈: Não, mas tá certo. Foi retirado.
18. A₇: Ah, é...
19. A₈: Mas ele foi retirado, será, pra gente ...ver...
20. A₉: porque... ver
21. A₇: Clica de novo.
22. A₈: Pra gente poder ver isso daqui.
23. A₇: Clica pra ver.
24. A₉: É que na verdade, o que que acontece? Se tu ...
25. A₈: Ah, ó. É diferente.
26. A₇: Ó, tá diferente.
27. A₉: É, viu? Cadê tua imaginação?
28. A₈: Aqui ele dá o padrão de interferência...
29. A₇: É que eu imaginei outra coisa. A gente tem que te ver depois.
30. A₈: ... e aqui não. Ele só... se dispersa.
31. A₇: É. Como no centro no meio.
32. A₈: Uma parte é refletida e a outra transmitida e aqui só simplesmente
33. reflete e aqui reflete também.
34. A₉: Cada vez que ele reflete, ele aumenta o ângulo de abertura do feixe. É.
35. A₇: É, daí eu não sei.
36. A₈: Eu não sei também. É. Se for pensar por aquele ponto que o professor falou
37. na aula passada dele não ser uma fonte pontual, né, e ser espalhado, ele
38. realmente teria esse efeito de abertura refletindo nos espelhos.

Esse diálogo mostra uma interanimação de vozes que o caracteriza como interativo e dialógico. Essa pluralidade de vozes permite que o grupo construa novos significados na resolução da tarefa. A atividade em si é organizada em conjunto por A₈ e A₇ através da leitura dos enunciados do roteiro exploratório (linhas 1-7). A₈ e A₇ dão início ao discurso (linha 8), que se desenvolve até o instante em que A₉ se convida para participar do diálogo (linha 13). Sua contribuição enriquece a discussão pautada pelas meninas, que passa então a ganhar uma nova dimensão.

A palavra “Imaginação” (linha 27) pronunciada por A₉ faz referência à expressão “Ai, falta de imaginação” (linha 16), enunciada por A₇ anteriormente. É difícil saber ao certo o contexto do qual A₇ a retirou para utilizá-la em sala de aula. Na voz de A₉, no entanto, a palavra imaginação é nitidamente usada como ventriloquação.

O enunciado “na verdade, o que que acontece?” (linha 24) é uma pergunta retórica que normalmente antecede uma explicação. Não se trata de uma dúvida acerca da veracidade dos acontecimentos, mas sim um mecanismo que organiza a própria ação no ato de explicar. Essa iniciativa sugere uma disputa ideológica, por parte de A₉, pelo papel de parceiro mais capaz.

Outro aspecto notável desse diálogo é o discurso citado no enunciado “Se for pensar por aquele ponto que o professor falou na aula passada dele não ser uma fonte pontual, né, e ser espalhado, ele realmente teria esse efeito de abertura” (linhas 36-38). Nele, o locutor se utiliza de um discurso emitido por outrem (professor) no passado para persuadir sua colega, corroborando a afirmação de A₉ (linha 34). A₈ cita o enunciado do professor de maneira muito misturada com a sua própria voz, imprimindo seu acento. Essa forma de citação caracteriza o discurso do discurso como sendo do estilo pictórico.

POLARIZAÇÃO DOS FEIXES DO LASER

Diálogo 34. No item 5 do roteiro exploratório, os estudantes colocaram um filtro polaróide num dos braços do anteparo, sob um ângulo de 90°, conforme mostra a figura 4. O objetivo era deduzir, a partir do experimento, a direção de polarização do feixe luminoso. O diálogo durou 1 minuto e 19 segundos.

01. A₇: Tá, agora tu vai marcar a seção Polaroid 1.
02. A₈: Filtro polaróide 1.
03. A₇: Bota 90 alí.
04. A₈: 90?
05. A₇: É.
06. A₉: ENTER.
07. A₈: Tá.
08. A₇: É que eu não sei se não tem que marcar de novo o espelho semi...
09. A₈: Não, acho que não. ... de opções ângulo e tecla ENTER. O que se observa em cada um dos anteparos? Por que observamos esse padrão?
10. A₇: Bom, um deles, que não tem o polaróide, tá um pouco mais fraco, mas tá igual. Ele transmitiu igual.
11. A₈: Não, aqui ele transmitiu, esse feixe veio pra cá, pra cá...
12. A₇: Ele transmite.
13. A₈: ... e esse daqui...
14. A₇: Vai pra lá. Só que ele já tem o polaróide que... o polaróide polariza.
15. A₈: Não, é que se tu for pensar que o 'laser'... se ele for um feixe polarizado horizontalmente, ele vai ser todo absorvido.
16. A₇: Sim, se tu botar um polarizador, ele vai... é.
17. A₈: Eu acho que é isso. É que não tem o espelho semi-refletor. Então ele não vai interferir.
18. A₇: Sim, ele vai reto, né.
19. A₉: Isso.

Podemos perceber nesse diálogo uma participação mais discreta de A₉. No entanto, a interanimação de vozes das meninas orienta a ação do grupo na resolução da tarefa. Não parece haver, como foi possível identificar nos episódios anteriores, uma hierarquização explícita entre os integrantes do grupo. Na organização social estabelecida por eles, todos parecem dividir as mesmas funções, com igual liberdade de participar do diálogo.

Interferência em regime clássico

Diálogo 35. No item 8 do roteiro exploratório, os estudantes retiraram todos os polaróides e recolocaram o segundo espelho semi-refletor. Eles tiveram que explicar o padrão de anéis projetado nos anteparos (figura 6). O diálogo durou cerca de 1 minuto e 40 segundos.

01. A₈: ... *Fonte de 'laser' e clique no botão verde. Desliga.*
 02. A₇: *Retire os três polaróides e recoloque o segundo semi-espelho. Ligue a fonte*
 03. *do 'laser'. Tá, é a mesma coisa e a gente já tinha visto.*
 04. A₈: *Gente, é questão da interferência, dos padrões de interferência que o*
 05. *professor explicou. Ele pede pra explicar...*
 06. A₇: *Um é a somativa do outro, né.*
 07. A₈: *Sim, um é o inverso do outro.*
 08. A₇: *É.*
 09. A₈: *Aqui, a gente, na realidade, não teria que observar esses anéis. A gente teria*
 10. *que observar só aqui uma mancha branca, que seria uma interferência*
 11. *destrutiva, e aqui só uma mancha vermelha. O professor explicou isso na*
 12. *aula passada.*
 13. A₇: *Sim. Eu acho que eu peguei uma parte. A gente observa que na verdade ele*
 14. *não é mono. Que o 'laser' não é mono. Se fosse, a gente observaria só*
 15. *branco ou a gente não... todas as franjas. Não é isso?*
 16. A₈: *Sim. Tem o fato não só*
 17. *dele não ser exatamente mono, mas ele não ser colimado também, né.*
 18. *Que é o que causa esse espalhamento pelo... nessa direção aqui. Daí, tu*
 19. *vai ter interfases diferentes e... porque o caminho que o feixe vai percorrer*
 20. *vai ser diferente pelo fato dele estar aberto. Aí tu vai ter um padrão de*
 21. *interferência diferente.*
 22. A₇: *Sim.*
 23. A₉: *Mas o importante era sempre o raio central.*
 24. A₈: *É notar que... é. Que no central... que esses anéis brancos*
 25. *no primeiro são máximos, né, de interferência destrutiva. Interferência*
 26. *construtiva os escuros.*

Esse diálogo é marcado por um desaparecimento quase que total da voz de A₉. Apesar de termos predominantemente a voz da A₈ nesse diálogo (linhas 9-12, 16-21 e 24-26), todos os enunciados de A₇ e a pequena intervenção de A₉ são incorporados no seu discurso, tornando sua fala essencialmente dialógica.

Interferência em regime quântico

Discurso 36. No item 15 do roteiro exploratórios, os alunos recolocaram o segundo espelho semi-refletor e substituíram os anteparos por detectores. O objetivo é explicar o padrão de interferência para fótons únicos. O diálogo durou cerca de 2 minutos.

01. A₉: *Vamos ver qual é o próximo.*
 02. A₇: *Desligue o 'laser' novamente. Posso desligar?*
 03. A₈: *Sim.*
 04. A₇: *Clique o botão reiniciar. Em instrumentos ...*
 05. A₈: *Semi-espelho 1. Ligue a fonte de 'laser' novamente. Se observa o padrão de*
 06. *interferência construtiva no detector azul.*
 07. A₇: *Tá, o que que a gente botou? O semi... Esse ali, né?*
 08. A₈: *Espelho. Ou seja, tá acontecendo a*
 09. *interferência construtiva no azul e destrutiva no amarelo.*
 10. A₇: *Isso que...*
 11. A₈: *Na verdade tu tá considerando*
 12. *o fóton um feixe único e em uma direção.*
 13. A₇: *Sim. Só que daí, tu tem que pensar ali porque ele tá indo só naquele.*
 14. A₈: *É a questão... é que ele não tá saindo aqui.*
 15. A₉: *Por causa de isso aqui ó. Tem que ter diferença de caminho*
 16. *óptico.*
 17. A₈: *Como?*
 18. A₉: *Diferença de caminho óptico. Tem 2L... que é esta distância aqui 2L, tá?*
 19. A₇: *A distância aqui é a mesma.*
 20. A₉: *Mais Nd. Nd é o...*
 21. A₈: *Ah, mas agora tu tem que considerar um único fóton, né.*
 22. A₇: *Mas a diferença é a mesma!*
 23. A₉: *Sim, mas é isso que ele fez, ó.*
 24. A₇: *Mas a diferença aqui é a mesma!*
 25. A₈: *Se tu considerar como um campo eletromagnético se propagando.*
 26. A₉: *Não. É diferente. Olha aqui, ó.*
 27. A₇: *Porque olha aqui, ó. Aqui, aqui e aqui ou aqui, aqui e aqui.*
 28. A₉: *Tá, mas o problema é que tem Nd aqui, ó. Quando tu reflete uma... uma*
 29. *diferença de comprimento de onda de π meio.*
 30. A₈: *Sim. Isso aqui é exatamente a mesma coisa que aconteceu*
 31. *com o 'laser'. Só que no 'laser' era emitido milhares de fótons por segundo*
 32. *e aqui é um fóton por segundo.*
 33. A₉: *Sim.*
 34. A₈: *O que a gente observa é que um fóton só interage por si mesmo.*
 35. A₉: *Ó, ele considera que cada reflexão...*
 36. A₈: *Daí, só é explicado por aquela superposição de estados.*

Esse diálogo é marcado por uma disputa ideológica pela função do parceiro mais capaz. Enquanto as meninas interagem dialogicamente na resolução da tarefa (linhas 2-10), A₉ impõe sua palavra através de uma abordagem comunicativa autoritária, interrompendo o diálogo e sobrepondo sua voz às outras falas (linhas 11 e 15). A palavra *ele* no enunciado “Ó, ele considera que cada reflexão...” (linha 42) demonstra que sua abordagem autoritária está apoiada na palavra do professor.

Não é seu conhecimento prévio que fundamenta seu discurso, mas sim as anotações em seu caderno!

Outro aspecto de igual destaque é o enunciado “Daí, só é explicado por aquela superposição de estado” (linha 43). A falta de detalhes na sua explicação sobre a natureza da interferência quântica sugere que o termo *superposição de estados* tenha sido usado por se tratar de uma situação típica na qual essa expressão é sempre evocada. Nesse caso, é possível que estejamos diante de um outro exemplo de gênero discursivo pertencente ao domínio da FQ.

Óptica ondulatória

Diálogo 37. No segundo encontro, os alunos tiveram de resolver uma lista de questões referentes às atividades desenvolvidas com o IMZ virtual. A questão 6 está relacionada ao item 8 do roteiro exploratório, no qual os alunos tiveram de explicar o padrão de anéis formado sobre os anteparos (figura 6). O diálogo durou 4 minutos e 15 segundos.

01. A₈: Porque os feixes projetados no ponto central do anteparo 2 estão fora de
02. fase? Uma Dica: analise os caminhos percorridos pelo feixe. Justamente.
03. A₉: Vamos ver o caminho 1... ele atravessa o espelho.
04. A₈: Ele atravessa...
05. A₉: É que é assim ó. Primeiro ele passa pelo primeiro espelho, aí ele cruza né.
06. Então é 2 Nd, dividido pelo espelho, mais...
07. A₇: Ah, é. É que, tipo... é... O que que varia é esse aqui, ó.
08. A₈: Sim.
09. A₇: Que aqui tu tá transmitindo e aqui tu tá refletindo.
10. A₉: Daí no segundo espelho ali que ele é refletido. No segundo espelho. Não, no
11. outro. Aí. É refletido.
12. A₇: Mas, aqui é igual nos dois. Aí não vai ser diferentes.
13. A₉: Tá, tá. Mas tem π meios aí. π meios. Mais... agora
14. vamos ver...
15. A₇: Aqui, metade, metade. Também não vai ser diferentes.
16. A₉: Tá, mas... isso no anteparo.
17. A₇: Por que nos dois casos, o que vem pra cá, ele...
18. A₈: Aí, depois ele é transmitido e tem mais dois Nd.
19. A₉: Mais 2 Nd.
20. A₇: Ou não.
21. A₉: Não, não. Tudo bem! Mas a pergunta é no anteparo 2.
22. A₈: No anteparo 2?
23. A₉: Anteparo 2.
24. A₇: Hu, hum.
25. A₉: Agora vamos ver o segundo feixe. O segundo feixe tem uma reflexão pra
26. direita, né. Então é π meios. π meios, mais... π meios
27. A₈: π meios no outro espelho.
28. A₉: π meios... mais ... π meios.
29. A₈: Mais π meios.
30. A₉: Então aqui tu vai ter...
31. A₈: Vai dá 3 π meios.

32. A₉: 3 π meios... no anteparo 2. 2 L mais d... Aqui, ó. Esse aqui, ó. Primeiro tem π
 33. meios. Tá? No segundo tem π meios, mais π meios, mais π meios. 3 π
 34. meios. Como a gente viu. Então, daí ele faz o seguinte. Ele faz φ B2 e esse
 35. φ BA. Aí, ele diminui um do outro.
 36. A₈: Que é π . Sim.
 37. A₉: Então ele vai ter um caminho... caminho óptico de π .

Nesse diálogo, podemos perceber claramente que A₉ exerce o papel de parceiro mais capaz (linhas 3, 5-6, 13-14 e 25-26). Ele impõe sua palavra ao grupo, assumindo uma abordagem autoritária em relação ao conteúdo de seu discurso. É possível identificar uma forte contestação de sua autoridade por parte de A₇ (linhas 12, 15 e 17). Essa disputa ideológica nas relações sociais do grupo é marcada por uma ruptura. Essa trégua ocorre quando A₈ reconhece a autoridade de A₉ e se convida para participar do diálogo (linha 27). A partir desse instante, podemos observar um padrão de interação do tipo I-R-P-R-F-R (linhas 28-36).

Física quântica

Diálogo 38. A questão 9 da lista refere-se ao item 13 do roteiro exploratório, no qual os estudantes tiveram de retirar o segundo espelho semi-refletor e substituir os anteparos por detectores (figura 7). O diálogo durou 1 minuto e 40 segundos.

01. A₈: É possível interferir... inferir. Não é Interferir no caminho óptico. Inferir o
 02. caminho percorrido pelo fóton? Há...
 03. A₇: Como assim?
 04. A₈: Se tem como a gente tentar explicar o caminho que o fóton percorre.
 05. A₇: Não.
 06. A₈: É, eu não me arriscaria. É eu vou botar escrito, eu não me arriscaria explicar.
 07. A₇: Põe. Porque não tem como.
 08. A₉: Tu consegue... Tu só consegue saber se é a metade do feixe.
 09. A₈: É, inferir...
 10. A₇: Tu sabe... Sim, mas daí é a probabilidade... não é ...
 11. A₈: É que tu não tem um (ininteligível) como o fóton se dividir, né.
 12. A₇: É.
 13. A₈: Tu tem uma função de onda. Tu tem um monte de auto-estados.
 14. A₇: Tu tem um momento. É, tu tem uma probabilidade.
 15. A₈: Tem só probabilidade de percorrer os caminhos.
 16. A₇: Tu não tem como adivinhar qual o momento...
 17. A₈: Vou botar aqui ó, não nos atrevemos a isto.
 18. A₉: Não, mas tu... Tu consegue saber que é a metade da intensidade.
 19. A₇: Sim. Isso sim. Mas tu não sabe dizer 'agora é esse caminho que ele tá
 20. percorrendo'. Tu não sabe dizer se ele tá indo pra cá ou se ele tá indo por
 21. aqui.
 22. A₈: Não, não é a metade da intensidade. Tu não sabe...
 23. A₇: Metade, metade.
 24. A₈: ... quando tu liga e tá saindo um fóton. Não vão chegar a metade da
 25. intensidade no anteparo e metade no outro.
 26. A₇: É.
 27. A₈: O fóton ou vai chegar no anteparo ou no outro.

28. A₇: *Mas é que com o tempo, vai ser metade, metade.*

Esse diálogo é marcado por uma redução abrupta da fala de A₉. Sua participação resume-se a duas pequenas intervenções, incorporadas ao diálogo das meninas (linhas 8 e 18). Sua abdicação da função do parceiro mais capaz permitiu que as meninas tivessem maior liberdade para negociar significados, tornando o diálogo, essencialmente, interativo e dialógico.

Diálogo 39. A questão 11 refere-se ao item 15 do roteiro exploratório, no qual os estudantes recolocaram o segundo espelho semi-refletor e substituíram os anteparos por detectores (figura 8). No item (a), eles tiveram de responder, a partir da simulação do IMZ virtual, se é possível inferir o caminho percorrido pelo fóton. O diálogo durou cerca de 30 segundos.

01. A₈: *Item 15. É possível inferir o caminho percorrido pelo fóton?*
 02. A₇: *Botei um semi-espelho ali.*
 03. A₈: *Pois é, eu não me atreveria também.*
 04. A₇: *Tá, mas olha que estranho ele tá indo somente...*
 05. A₈: *Aqui é interferência construtiva, agora...*
 06. A₇: *Há é aquele caso que a gente viu antes.*
 07. A₈: *Só que tem uma questão foda agora, que é o regime monofotônico, né. Então*
 08. *é como se ele interferisse com ele mesmo.*

Nesse diálogo é marcado pela ausência total da voz de A₉. É visível a maneira dialógica com que suas vozes se interanimam na construção e negociação de significados. Outro aspecto importante desse discurso é o enunciado “é como se ele interferisse com ele mesmo”. A expressão é como sugere uma explicação típica utilizada numa situação específica ao invés de um posicionamento filosófico segundo as interpretações da FQ, caracterizando essa fala como um gênero discursivo. O mesmo não ocorre no uso de “função de onda” e “auto-estados” (diálogo 38, linha13).

Diálogo 40. Após responder a questão 11a (diálogo 39), os estudantes discutiram novamente aspectos da questão 9 (diálogo 38). O diálogo durou 2 minutos e 40 segundos.

01. A₇: *Tá, mas aqui e posso dizer. É.*
 02. A₈: *Não porque ele não tá indo só para aquele detector. Ele tá interferindo*
 03. *construtivamente em um.*

04. A₇: *E destrutivamente em outro. Anota isso.*
 05. A₈: *Então ele tá percorrendo os dois caminhos, né. Vou botar NÃO.*
 06. A₉: *Acho eu que... não sei não. Dá pra criar dúvidas.*
 07. A₈: *O que foi?*
 08. A₉: *Só, só voltando uma pergunta. Nessa questão aqui, ó. Pra responder essa, tá.*
 09. *Ele ia, ele pergunta qual o caminho óptico, né. Do fóton. A gente viu que*
 10. *tinha um fóton aqui e fóton aqui, né.*
 11. A₈: *Hu, hum.*
 12. A₉: *Então não é assim que a gente fez, que é 2 Nd mais d, mais d, pra cá, né. E*
 13. *aqui seria Nd, não. Hã... d mais d, né.*
 14. A₈: *Sim.*
 15. A₉: *Sim se não tivesse esse espelho aqui, né.*
 16. A₈: *Sim. Mas é que ele não tá perguntando... ele... acho que ele só tá*
 17. *perguntando... porque como tá em regime monofotônico, qual caminho que*
 18. *o fóton vai seguir. Se a gente teria como saber o caminho que ele vai*
 19. *seguir e explicar. Vendo por ele ser detectado no anteparo.*
 20. A₉: *Mas concorda que a gente sabe que ou ele vai por esse caminho aqui ou ele*
 21. *vai por esse caminho, né.*
 22. A₈: *Sim. Se ele for detectado no detector 1, ele foi pelo caminho um.*

Esse diálogo é mais um exemplo de interação discursiva com abordagem comunicativa dialógica, no qual os participantes do debate vão negociando significados através da interanimação de vozes. No entanto, há um fenômeno particularmente interessante nesse diálogo. As intervenções de A₉ mudam completamente o resultado da tarefa, organizando a ação das meninas num sentido contrário. Os enunciados “não sei não... Dá pra criar dúvidas”(linha 6) e a o argumento confuso desenvolvido na linha 12 sugerem que, até esse exato momento, A₉ não tinha ainda a resposta para o problema. Sua fala não é simplesmente retórica. Ela organiza sua própria ação enquanto dialoga com outras vozes. A conclusão final do grupo explicitado nas falas “Mas tu concorda a gente sabe que ou ele vai por esse caminho aqui ou ele vai por esse caminho” (linha 20-21) e “Se ele for detectado pelo detector 1, ele foi pelo caminho 1” (linha 22) surge através de um processo de interanimação de vozes no qual não podemos mais definir quem resolveu o problema. Esse parece ser outro exemplo de cognição socialmente compartilhada.

5.2.5 Síntese dos resultados da análise do discurso

Os resultados da análise mostram que em atividades colaborativas com outros colegas, um dos integrantes do grupo sempre assume pra si a função do

parceiro mais capaz. Na maior parte dos casos esse papel é conquistado através de uma disputa ideológica entre os componentes do grupo, no qual o domínio do conteúdo científico envolvido na atividade em questão é utilizado para definir as relações sociais de poder e de autoridade. Essas tensões e conflitos ideológicos emoldurados na fala dos estudantes reforçam a noção bakhtiniana de que a palavra é a arena onde se desenvolvem as lutas de classes (BAKHTIN, 2006). Essa disputa ideológica pela função do parceiro mais capaz, no entanto, não ocorre entre as meninas, como mostra os diálogos da seção anterior. Elas elaboram um tipo de discurso dialógico e interativo, no qual se percebem claramente as interanimações de vozes nos processos de construção e de negociação de significados.

Nos enunciados explicativos, a fala do parceiro mais capaz é perpassada por um mecanismo de transição que modifica sua função mediadora, deslocando o sentido de sua orientação. Inicialmente, os enunciados são orientados internamente, organizando a ação do locutor de forma bastante similar à fala egocêntrica encontrada nas crianças ao executar uma tarefa (VYGOTSKY, 1994). Uma vez alcançada a compreensão, evidenciada pela imposição de uma réplica ao próprio enunciado, o locutor passa a imprimir uma série de perguntas retóricas e afirmações que são orientadas externamente, com a finalidade de organizarem a ação do ouvinte. Nesse segundo movimento, é possível identificar o uso de alguns gêneros discursivos pertencentes ao domínio das aulas de FQ, tais como “o colapso da função de onda” e “o fóton interfere com ele mesmo”.

As atividades desenvolvidas com o IMZ virtual, quando articuladas ao roteiro exploratório e à lista de questões conceituais, possibilitaram a criação de zonas de desenvolvimento proximal ao proporcionar tarefas que só puderam ser resolvidas em colaboração com os colegas ou com a ajuda do professor da disciplina. As ações mediadas pelo uso do *software* possibilitaram ainda, por parte dos estudantes, a construção e a negociação de significados pertencentes ao domínio da FQ. Nesse sentido, o IMZ virtual se mostrou uma ferramenta cultural extremamente poderosa, tanto em termos de motivação para o estudo da FQ, quanto no que diz respeito à facilitação dos processos de compreensão e construção de significados aceitos cientificamente, evidenciada nos diálogos analisados na seção anterior (diálogo 10, linhas 19-24; diálogo 11, linhas 5 e 9-16; diálogo 19, linhas 5-12; diálogo 22, linhas 11 e 14; diálogo 29, linhas 1-2; diálogo 30, linhas 1-5; diálogo 32, linhas 14-17;

diálogo 36, linhas 8-9 e 40-43; diálogo 38, linhas 22-28; diálogo 39, linhas 1-6; diálogo 40, linhas 20-22).

As atividades desenvolvidas na exploração do *software* possibilitaram a contextualização de uma série de conceitos e princípios introduzidos nas disciplinas cursadas pelos alunos em semestres anteriores (A Física do Século XX – A; A Física do Século XX – B), tais como fóton, dualidade onda-partícula, função de onda, superposição de estados, densidade de probabilidade, entre outros. Com base no engajamento dos estudantes à atividade proposta, podemos afirmar que o IMZ virtual deu “vida” aos conceitos de FQ, tornando “visíveis” alguns dos aspectos da teoria que, em disciplinas anteriores, eram apresentados somente através do formalismo matemático. Esses aspectos conceituais da teoria são fundamentais para a formação de professores que possam viabilizar possíveis transposições didáticas do conteúdo em questão para o ensino médio.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho, analisamos as interações discursivas de nove estudantes da sétima etapa do curso de Licenciatura em Física da UFRGS em uma atividade didática mediada pelo uso de uma bancada virtual do interferômetro de Mach-Zehnder. Inicialmente, fizemos um levantamento das noções prévias dos alunos acerca da dualidade onda-partícula, através de um teste de concepções sobre o efeito fotoelétrico, o experimento de fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder. A seguir, implementamos uma atividade didática centrada no uso do *software*, a partir de um roteiro exploratório e de uma lista de questões conceituais, elaborados especialmente para o presente estudo. Finalmente, analisamos os diálogos estabelecidos pelos alunos durante a execução das tarefas, à luz do referencial sociocultural, segundo alguns elementos das teorias de L. S. Vygotsky e M. M. Bakhtin.

Os resultados da análise discursiva mostraram a importância da linguagem e dos instrumentos semióticos na execução de tarefas didáticas relativas ao ensino de física quântica. Foi possível identificar algumas estruturas de fala similares às formas de organização da sociedade, nas quais a desigualdade nas relações de domínio discursivo está diretamente relacionada à diferença de conhecimento científico por parte dos estudantes. Os resultados também mostraram o uso freqüente de fala egocêntrica, bem como a imposição de réplicas aos enunciados durante os processos de compreensão. Foi possível identificar o uso de alguns gêneros discursivos pertencentes ao domínio da física quântica. As ações mediadas pelo uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder, como ferramenta cultural, possibilitaram a construção e a negociação de novos significados em sala de aula. Nesse sentido, o *software* em questão se mostrou uma ferramenta sociocultural extremamente poderosa na mediação dos processos de internalização, por parte dos estudantes. A atividade possibilitou uma série de discussões que possivelmente não seriam discutidos em uma aula de física quântica tradicional (por exemplo, o estado de polarização de um único fóton).

Não obstante, os resultados apontaram para a necessidade de se abordar as diferentes interpretações da física quântica antes da intervenção didática com o *software*. A ausência da pluralidade de vozes na construção das explicações acerca

dos fenômenos observados no interferômetro foi fator decisivo na emolduração de discursos autoritários, por parte de alguns alunos. A pesquisa mostrou também a necessidade de se incorporar temas mais avançados, tais como o experimento da escolha demorada, a questão da medição de trajetória, entre outros. Essas complementações deverão ser feitas mediante uma nova investigação, na qual serão implementados de novos elementos na programação no interferômetro virtual de Mach-Zehnder, como, por exemplo, a introdução de detectores de não-demolição. Os resultados também mostraram a necessidade de ampliar a pesquisa para outras disciplinas do curso de Licenciatura em Física que abordam conteúdos de física quântica (A Física do Século XX – A, Laboratório de Física Moderna, A Física do Século XX – B). Essa ampliação possibilitará um melhor entendimento do contexto sociocultural no qual os estudantes entram, pela primeira vez, em contato com a teoria. Esperamos, através do presente trabalho, ter contribuído, de forma significativa, para o debate acadêmico sobre o ensino de física quântica, reforçando a importância de promover estudos na formação inicial de professores.

REFERÊNCIAS

ABD-EL-KHALICK, F. Rutherford's enlarged: a content-embedded activity to teach about nature of science. *Physics Education*, London, v. 37, n. 1, p. 64-68, Jan. 2002.

ALSOP, S. Living with and learning about radioactivity: a comparative conceptual study. *International Journal of Science Education*, London, v. 23, n. 3, p. 263-281, Jan. 2001.

ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la relatividad especial en el nivel medio y polimodal. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 8, n. 1, p. 55-69, mar. 2002.

ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. In: *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, v. 3, n. 2, 2004. Disponível em <<http://www.saum.uvigo.es/reec>>. Acesso em: 16 fev. 2007.

ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. Introducción de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio/polimodal de enseñanza: identificación de teoremas-en-acto y determinación de objetivos-obstáculo. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 01-21, ago. 2006.

ARRUDA, S. M.; TOGINHO FILHO, D. O. Laboratório caseiro de física moderna. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, p. 390- 394, nov. 2004. ed. esp.

BAKHTIN, M. M. *Marxismo e filosofia da linguagem*. 12. ed. São Paulo: Editora Hucitec, 2006. 206 p.

BARNES, M. B.; GARNER, J.; REID, D. The pendulum as a vehicle for transitioning from classical to quantum physics: history, quantum concepts and educational challenges. *Science & Education*, New York, v. 13, n. 4-5, p. 417–436, July 2004.

BERENGUER, R. A. A.; SELLES, J. F. P. Una nueva propuesta didáctica para la enseñanza de la relatividad en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 19, n. 2, p 335-340, jul. 2001.

BERG, E.; HOEKZEMA, D. Teaching conservation laws, symmetries and elementary particles with fast feedback. *Physics Education*, London, v. 41, n. 1, p. 47-56, Jan. 2006.

BERGSTRÖM, L.; JOHANSSON, K. E.; NILSSON, Ch. The physics of Copenhagen for students and the general public. *Physics Education*, London, v. 36, n. 5, p. 388-393, Sept. 2001.

BLACK, E. D.; GUTENKUNST, R. N. An introduction to signal extraction in interferometric gravitational wave detectors. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 4, p. 365-378, Apr. 2003.

BUDDE, M.; NIEDDERER, H.; SCOTT, P.; LEACH, J. 'Electronium': a quantum atomic teaching model. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 197-203, May 2002 a.

BUDDE, M.; NIEDDERER, H.; SCOTT, P.; LEACH, J. The quantum atomic model 'Electronium': a successful teaching tool. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 204-210, May 2002b.

BUNGE, M. Quantons are quaint but basic and real, and the quantum theory explains much but not everything: reply to my commentators. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5-6, p. 587-597, Aug. 2003 a.

BUNGE, M. Twenty-five centuries of quantum physics: from Pythagoras to us, and from subjectivism to realism. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 445-466, Aug. 2003 b.

CARSTENS-WICKHAM, B. The atomic era: a new interdisciplinary course combining physics, the humanities and the social sciences. *Physics Education*, London, v. 36, n. 3, p. 212-217, May 2001.

CAVALCANTE, M. A.; PIFFER, A; NAKAMURA, P. O uso da internet na compreensão de temas de física moderna para o ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São Paulo, v. 23, n. 1, p. 108-112, mar. 2001.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de física moderna que visa sua inserção no ensino médio. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 263-276, dez. 2001.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; SOUZA, D. F.; MUZINATTI, J. Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 24-29, maio 2002.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R.C.; HAAG, R. Experiências em física moderna. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 75-82, maio 2005.

CINI, M. How real is the quantum world? *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 531-540, Aug. 2003.

CORDERO, A. Understanding quantum physics. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 503-511, Aug. 2003.

DANIEL, M. Particles, Feynman diagrams and all that. *Physics Education*, London, v. 41, n. 2, p. 119-129, May 2006.

DEGIORGIO, V. Phase shift between the transmitted and the reflected optical fields of a semireflecting lossless mirror is $\pi/2$. *American Journal of Physics*, New York, v. 48, n. 1, p. 81-82, Jan. 1980.

DIAS, N. L.; PINHEIRO, A. G.; BARROSO, G. C. Laboratório virtual de física nuclear. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 232-236, jun. 2002.

DUNNE, P. A reappraisal of the mechanism of pion exchange and its implications for the teaching of particle physics. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 211- 222, May 2002.

DUNNE, P. Looking for consistency in the construction and use of Feynman diagrams. *Physics Education*, London, v. 36, n. 5, p. 366-374, Sept. 2001.

EHRlich, R. Faster-than-light speeds, tachyons, and the possibility of tachyonic neutrinos. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 11, p. 1109-1114, Nov. 2003.

EICHLER, M. L.; JUNGES, F.; DEL PINO, J. C. Cidade do átomo, um software para o debate escolar sobre energia nuclear. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 17-21, maio 2006.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman lecture on Physics*. New York: Addison-Wesley, 1963. v. 3.

FREIRE Jr., O. A story without an ending: the quantum physics controversy 1950–1970. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 573-586, Aug. 2003.

GOFF, A. Quantum tic-tac-toe: a teaching metaphor for superposition in quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 11, p. 962-973, Nov. 2006.

GRECA, I. M.; FREIRE JR., O. Does an emphasis on the concept of quantum status enhance student's understanding of quantum mechanics? *Science & Education*, New York, 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 una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 20, n. 2, p. 327-338, jun. 2002.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 61-77, jan. 2005.

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

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

GUNEL, M.; HAND, B.; GUNDUZ, S. Comparing student understanding of quantum physics when embedding multimodal representations into two different writing format: presentation format versus summary report format. *Science Education*, Hoboken, v. 90, n. 6, p. 1092-1112, Nov. 2006.

HARSHMAN, N. L. Visualizing the mass and width spectrum of unstable particles. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 10, p. 984-989, Oct. 2003.

HEATHCOTE, A. Quantum heterodoxy: realism at the Plank length. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 513-530, Aug. 2003.

HOBSON, A. Electrons as field quanta: a better way to teach quantum physics in introductory general physics courses. *American Journal of Physics*, Melville, v. 73, n. 5, p. 630-634, May 2005.

IRESO, G. Measuring the transition temperature of a superconductor in a pre-university laboratory. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 556-559, Nov. 2006.

JACOBS, K.; WISEMAN, H. M. An entangled web of crime: Bell's theorem as a short story. *American Journal of Physics*, Melville, v. 73, n. 10, p. 932-937, Oct. 2005.

JOHANSSON, K. E.; KOZMA, C.; NILSSON, Ch. Einstein for schools and the general public. *Physics Education*, London, v. 41, n. 4, p. 328-333, July 2006.

JONES, G. T. The uncertainty principle, virtual particles and real forces. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 223-233, May 2002.

KALKANIS, G.; HADZIDAKI, P.; STAVROU, D. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concept. *Science Education*, Hoboken, v. 87, n. 2, p. 257-279, 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*, New York, v.14, n. 7/8, p. 607-629, Nov. 2005.

KARAM, R. A. S.; SOUZA CRUZ, S. M. S. C.; COIMBRA, D. Tempo relativístico no início do ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 373-386, set. 2006.

KE, J.; MONK, M.; DUSCHL, R. Learning introductory quantum physics: sensorimotor experiences and mental models. *International Journal of Science Education*, London, v. 27, n. 13, p. 1571-1594, Feb. 2005.

KENNY, P. Time dilation in special relativity: an alternative derivation. *Physics Education*, London, v. 41, n. 4, p. 334-336, July 2006.

KOFOED, M. H. The Hiroshima and Nagasaki bombs: role-play and students' interest in physics. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 502-507, Nov. 2006.

KÖHNLEIN, J. F. K.; PEDUZZI, L. O. Q. Uma discussão sobre a natureza da ciência no ensino médio: um exemplo com a teoria da relatividade restrita. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 36-70, abr. 2005.

KOVAČEVIĆ, M. S.; DJORDJEVIĆ, A. A mechanical analogy for the photoelectric effect. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 551-555, Nov. 2006.

LEVRINI, O. Reconstructing the basic concepts of general relativity from an educational and cultural point of view. *Science & Education*, New York, v. 11, n. 3, p. 263-278, May 2002.

LÉVY-LEBLOND, J. M. On the nature of quantons. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 495-502, Aug. 2003.

LIMA JÚNIOR, P.; OSTERMANN, F.; REZENDE, F.; CAVALCANTI, C. Questões de gênero na preferência de disciplinas e na escolha profissional de estudantes brasileiros: implicações para o ensino de ciências. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6., Florianópolis. Anais do ... E. F. Mortimer (Org.). Florianópolis: ABRAPEC, 2007. 1 CD-ROM.

LINTON, J. O. The Doppler shift and the photon. *Physics Education*, London, v. 36, n. 4, p. 320-321, July 2001.

LOBATO, T.; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 1, p. 119-132, maio 2005.

LOVELL, M. S. Relativity and gravitation on Ollie and Phil's planet: a three-dimensional approach. *Physics Education*, London, v. 40, n. 3, p. 223-228, May 2005.

MACHADO, D. I.; NARDI, R. Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com suporte da hipermídia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 473-485, dez. 2006.

MACKINTOSH, R. S. Telling the world about nuclear physics. *Physics Education*, London, v. 36, n. 1, p. 35-39, Jan. 2001.

MALD, R. M. Resource letter TMGR-1: teaching the mathematics of general relativity. *American Journal of Physics*, Woodbury, v. 74, n. 6, p. 471-477, June 2006.

MARQUES, A. J.; SILVA, C. E. Utilização da Olimpíada Brasileira de Astronomia como Introdução à Física Moderna no Ensino Médio. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 34-35, out. 2005.

MÅRTENSSON-PENDRILL, A. The Manhattan project: a part of physics history. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 493-501, Nov. 2006.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. Einstein, a física dos brinquedos e o princípio da equivalência. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 22, n. 3, p. 299-315, dez. 2005.

MERMIN, N. D. From Cbits to Qbits: teaching computer scientists quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 1, p. 23-30, Jan. 2003.

MONTENEGRO, R. L.; PESSOA Jr., O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 107-126, maio/ago. 2002.

MORTIMER, E. F.; SCOTT, P. Atividade discursiva nas salas de aula de ciências: uma ferramenta sociocultural para analisar e planejar o ensino. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 1-12, dez. 2002.

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

OGBORN, J. Introducing relativity: less may be more. *Physics Education*, London, v. 40, n. 3, p. 213-222, May 2005.

OGBORN, J.; TAYLOR, E. F. Quantum physics explains Newton's laws of motion. *Physics Education*, London, v. 40, n. 1, p. 26-34, Jan. 2005.

OLSEN, R. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, London, v. 24, n. 6, p. 565-574, June 2002.

OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M. Preparing teachers to discuss superconductivity at high school level: a didactical approach. *Physics Education*, London, v. 41, n. 1, p. 34-41, Jan. 2006.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Updating the physics curriculum in high schools: a teaching unit about superconductivity. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vigo, v. 3, n. 2, p. 1-13, 2004. Disponível em: <www.saum.uvigo.es/reec>. Acesso em: 23 jan. 2007.

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

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. de H. Um pôster para ensinar física de partículas na escola. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 13-18, maio 2001.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, fev. 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*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 22-25, maio 2006.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Conceitos de física quântica na formação de professores: relatos de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 09-35, abr. 2005.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 2, p. 235-258, maio 2004.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 83-102, abr. 2004.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e a aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos

de física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 2, p. 176-190, ago. 2002.

PASCOLINI, A.; PIETRONI, M. Feynman diagrams as metaphors: borrowing the particle physicist's imagery for science communication purposes. *Physics Education*, London, v. 37, n. 4, p. 324-328, July 2002.

PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 63-73, maio/ago. 2004.

PAURI, M. Don't ask Pythagoras about the quantum. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 467-478, Aug. 2003.

PEDUZZI, L. O. Q. Física e filosofia: uma aproximação através de um texto na disciplina estrutura da matéria. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 5-20, maio 2004.

PEREIRA, A. P. de; OSTERMANN, F. Uma análise da produção acadêmica recente sobre o ensino de física moderna e contemporânea no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6., Florianópolis. Anais do ... E. F. Mortimer (Org.) Florianópolis: ABRAPEC, 2007. 1 CD-ROM.

PÉRES, H.; SOLBES, J. Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de la Ciencias*, Barcelona, v. 21, n.1, p. 135-146, marzo 2003.

PÉRES, H.; SOLBES, J. Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física. *Enseñanza de la Ciencias*, Barcelona, v. 24, n. 2, p. 269-284, jun. 2006.

PESSOA Jr, O. *Conceitos de física quântica*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005. v. 1.

POSPIECH, G. Philosophy and quantum mechanics in science teaching. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5/6, p. 559-571, Aug. 2003.

REGO, F.; PERALTA, L. Portuguese students' knowledge of radiation physics. *Physics Education*, London, v. 41, n. 3, p. 259-262, May 2006.

REZENDE, F.; OSTERMANN, F. Interações discursivas on-line sobre epistemologia entre professores de física: uma análise pautada em princípios do referencial sociocultural. *Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencia*, Vigo, v. 5, n. 3, 2006. Disponível em: <www.saum.uvigo.es/reec>. Acesso em: 02 jul. 2007.

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 na introdução da física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, mar. 2007.

SAMAGAIA, R.; PEDUZZI, L. O. Q. Uma experiência com o projeto Manhattan no ensino fundamental. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 10, n. 2, p. 259-276, maio 2004.

SÁNCHEZ, M. A.; SELVA, V. S. La relatividad en el bachillerato. una propuesta de unidad didáctica. *Enseñanza de la Ciencias*, Barcelona, v. 24, n. 3, p. 439-352, nov. 2006.

SANTIAGO, M. A. M.; TAVARES, M.; CAVALCANTI, G. H. Elaboração de um curso introdutório de física de plasma. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 104-107, mar. 2001.

SANTOS, R. P. B. Relatividade restrita com o auxílio de diagramas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 23, n. 2, p. 238-255, ago. 2006.

SCHERR, R. E.; SHAFFER, P. S.; VOKOS, S. Student understanding of time in special relativity: simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, Melville, v. 69, n. 7, p. 24-35, July 2001.

SCHERR, R. E.; SHAFFER, P. S.; VOKOS, S. The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 12, p. 1238-1248, Dec. 2002.

SCOTT, A. J. 3-D spreadsheet simulation of a modern particle detector. *Physics Education*, London, v. 39, n. 1, p. 91-95, Jan. 2004.

SILVEIRA, F. L. Validação de testes de lápis e papel. In: MOREIRA, M. A.; SILVEIRA, F. L. *Instrumentos de pesquisa em ensino e aprendizagem*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1993, p. 1-35.

SILVEIRA, F. L.; MOREIRA, M. A.; AXT, R. Estrutura interna de testes de conhecimento em física: um exemplo em mecânica. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 10, n. 2, p.187-194, jun. 1992.

TABER, S. K. Learning quanta: barriers to stimulating transition in student understanding of orbital ideas. *Science Education*, Hoboken, v. 89, n.1, p. 257-279, Jan. 2005.

TABER, S. K. When the analogy breaks down: modelling the atom on the solar system. *Physics Education*, London, v. 36, n. 3, p. 222-226, May 2001.

TOAL, V. A simple approach to phase holography. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 9, p. 948-949, Sept. 2003.

VALADARES, E. de C.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no ensino médio: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, p. 359-371, nov. 2004. ed. esp.

VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994. 191 p.

WALTHAM, C. Teaching neutrino oscilation. *American Journal of Physics*, Melville, v. 72, n. 6. p. 742-482, June 2004.

WERTCH, J. V. *Voces de la mente: un enfoque sociocultural para el estudio de la acción mediada*. Madrid: Visor Distribuciones, 1993. 185 p.

WILLIAMS, G. Antimatter and 20th century science. *Physics Education*, London, v. 40, n. 3, p. 238-244, May 2005.

YANG, F. Senior high school students' preference and reasoning modes about nuclear energy use. *International Journal of Science Education*, London, v. 25, n. 2, p. 221-244, Jan. 2003.

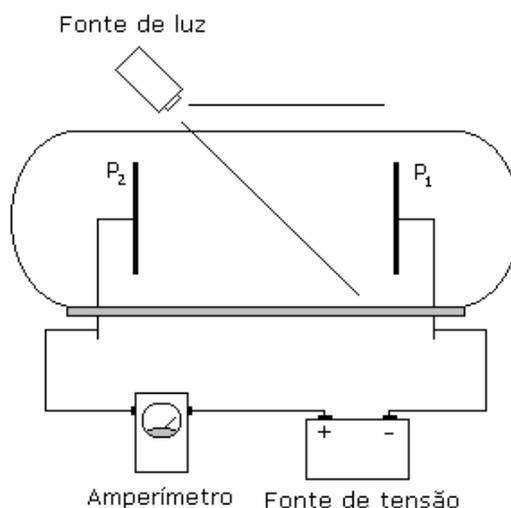
YODER, G. Using classical probability functions to illuminate the relation between classical and quantum physics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 5, p. 404-411, May 2006.

APÊNDICES

Apêndice A – Teste de concepções relativas à dualidade onda-partícula

INSTRUÇÃO: As questões 01 a 06 referem-se ao enunciado abaixo.

A figura abaixo representa uma montagem experimental onde um feixe monocromático de radiação ultravioleta, emitido por uma fonte, atinge uma placa metálica, P_1 , contida no interior de uma ampola de vácuo e ligada externamente ao pólo negativo de uma fonte de tensão. Na presença do feixe ultravioleta, P_1 emite elétrons que são coletados por outra placa, P_2 , contida no interior da mesma ampola e ligada ao pólo positivo da mesma fonte de tensão.



O amperímetro conectado no circuito registra a corrente elétrica correspondente ao número de elétrons transferidos de P_1 para P_2 , através do vácuo da ampola. A fonte de tensão é variável e pode ter sua polaridade invertida para frear os elétrons, e medir a sua energia.

01. Suponha que a intensidade do feixe de radiação ultravioleta seja aumentada. Pode-se afirmar que a energia dos elétrons emitidos de P_1

- (A) permanecerá inalterada.
- (B) aumentará imediatamente.
- (C) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida, aumentará gradualmente.
- (D) diminuirá imediatamente.
- (E) irá imediatamente a zero.

02. Suponha que a intensidade do feixe de radiação ultravioleta seja reduzida. Pode-se afirmar que o número de elétrons emitidos de P_1

- (A) permanecerá inalterado.
- (B) aumentará imediatamente.
- (C) diminuirá imediatamente.
- (D) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida diminuirá gradualmente.
- (E) irá imediatamente a zero.

03. Suponha que a freqüência do feixe de radiação ultravioleta seja levemente reduzida. Nesse caso o número de elétrons emitidos de P_1 pode

- (A) permanecer inalterado.
- (B) aumentar imediatamente.
- (C) diminuir imediatamente.
- (D) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, diminuir gradualmente.
- (E) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, aumentar gradualmente.

04. Suponha que a freqüência do feixe de radiação ultravioleta seja levemente aumentada. Pode se afirmar que a energia dos elétrons emitidos de P_1

- (A) permanecerá inalterada.
- (B) aumentará imediatamente.
- (C) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida, aumentará gradualmente.
- (D) diminuirá imediatamente.
- (E) permanecerá inicialmente inalterado e, em seguida, diminuirá gradualmente.

05 – Suponha que a freqüência do feixe de radiação ultravioleta seja bruscamente reduzida até atingir a faixa do espectro visível correspondente à luz vermelha. Nesse caso, o número de elétrons emitidos de P_1 pode

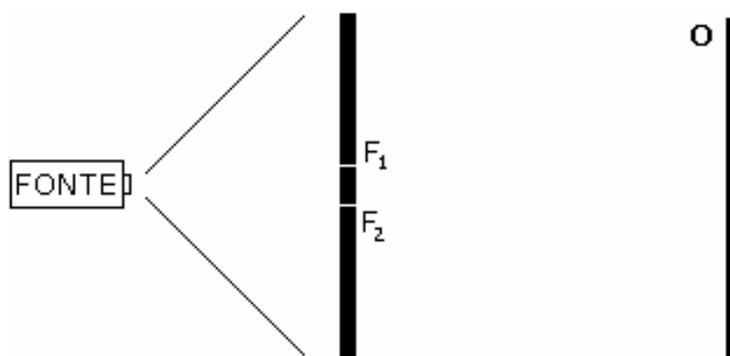
- (A) diminuir gradualmente.
- (B) aumentará gradualmente.
- (C) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, aumentar gradualmente.
- (D) permanecer inicialmente inalterado e, em seguida, diminuir gradualmente.
- (E) zerar imediatamente.

06. Se a intensidade do feixe de radiação ultravioleta emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico). Pode-se afirmar que P_1 emitiria

- (A) um único elétron de cada vez, com energia cinética igual à energia do fóton.
- (B) um único elétron de cada vez, com energia cinética menor que a energia do fóton.
- (C) um único elétron de cada vez, com energia cinética maior que a energia do fóton.
- (D) mais de um elétron simultaneamente, cada um com energia cinética igual a uma fração da energia do fóton.
- (E) mais de um elétron simultaneamente, cada um com energia cinética igual a um múltiplo inteiro da energia do fóton.

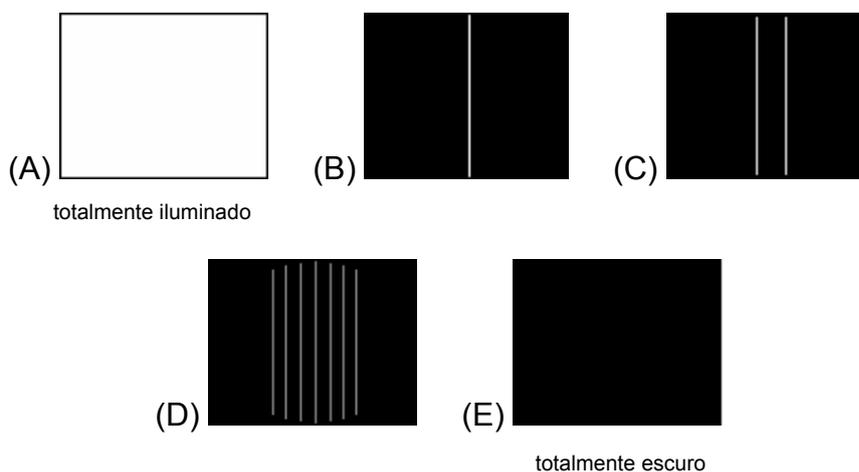
INSTRUÇÃO: As questões 07 a 11 referem-se ao enunciado abaixo.

A figura abaixo representa uma montagem experimental, vista de cima, de um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa. O feixe luminoso passa por duas fendas estreitas e paralelas, F_1 e F_2 , antes de ser projetado num anteparo O , constituído de uma tela fosforescente.

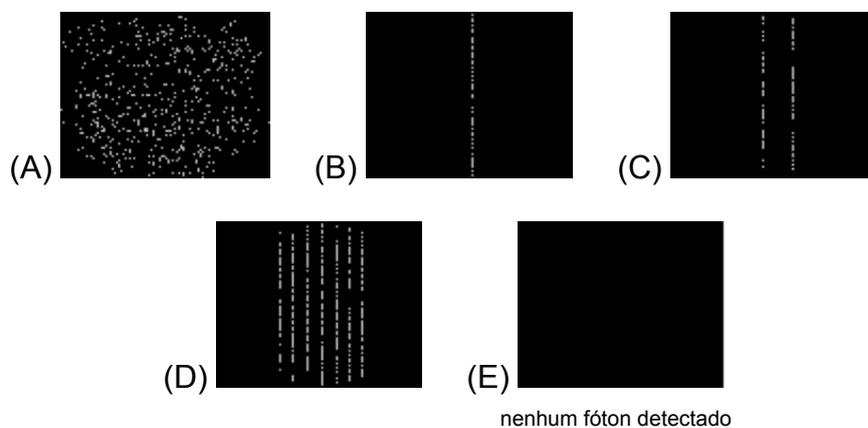


Considere que a espessura das fendas, assim como a separação entre as mesmas, são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz incidente e muito menor que a distância entre as fendas e o anteparo.

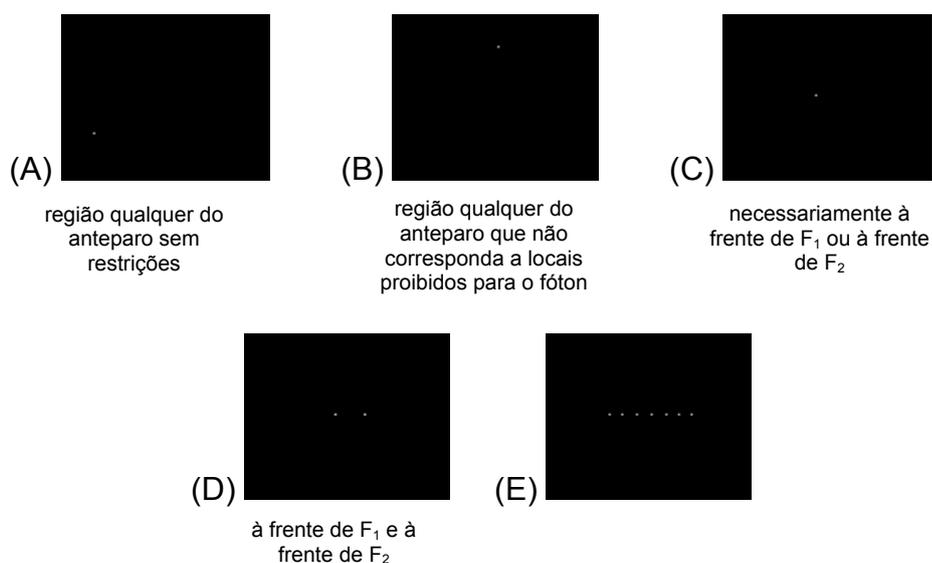
07. Qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, observada no anteparo?



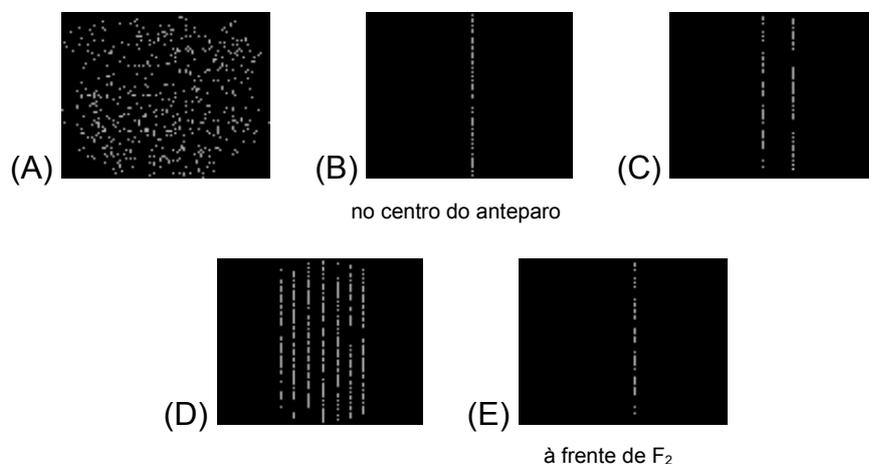
08. Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a taxa de emissão seja de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



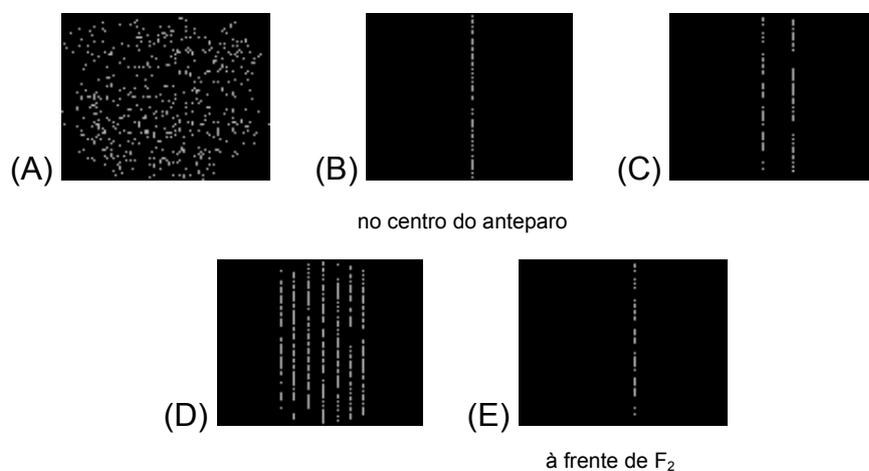
09. Se a fonte emitisse apenas um único fóton, qual das alternativas melhor representa uma possível imagem, vista de frente, que poderia ser vista no anteparo após a sua emissão?



10. Supondo ainda o mesmo regime monofotônico, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição* fosse colocado em F_1 ?



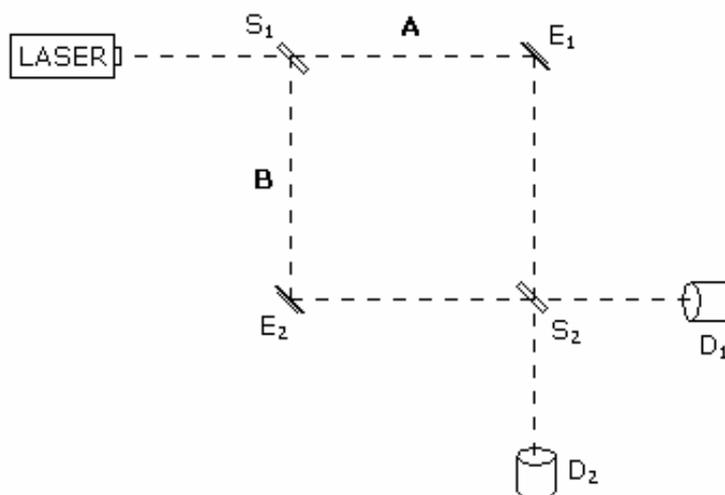
11. Se, na ausência do detector, a fonte emitisse um feixe mono-energético de elétrons (todos de mesma energia) com intensidade suficientemente baixa para que um único elétron seja emitido de cada vez, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após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



* Trata-se de um dispositivo capaz de detectar o fóton sem absorvê-lo.

INSTRUÇÃO: As questões 12 a 16 referem-se ao enunciado abaixo.

A figura abaixo representa um interferômetro de Mach-Zehnder. Um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa, incide sobre um espelho semi-refletor S_1 que divide o feixe em uma componente transmitida (caminho A) e outra componente refletida (caminho B), ambas de mesma intensidade e coerentes. Após serem refletidos pelos espelhos E_1 e E_2 , ambas as componentes recombinam-se num espelho semi-refletor S_2 antes de atingirem os detectores D_1 e D_2 .



Admitindo que as componentes refletidas sofrem um deslocamento de fase de $\pi/2$ (correspondente a uma diferença de caminho óptico de $1/4$ de comprimento de onda), pode-se verificar que as componentes do feixe que incidem em D_1 estão em fase (interferência construtiva), enquanto que as componentes do feixe que incidem em D_2 estão defasados em $\lambda/2$ (interferência destrutiva). Têm-se, portanto, 100% do feixe detectado em D_1 e 0% do feixe detectado em D_2 .

12. Se, no experimento descrito acima, a intensidade da luz emitida pela fonte fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), a uma taxa de um fóton por segundo, pode-se afirmar que, após algumas horas, D_1 detectaria

- (A) todos os fótons emitidos.
- (B) a grande maioria dos fótons emitidos.
- (C) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
- (D) uma pequena minoria dos fótons emitidos.
- (E) nenhum dos fótons emitidos.

13. Suponha que, ainda em regime monofotônico, um detector de fótons de não-demolição, D_0 , fosse colocado entre E_1 e S_2 (caminho A). Pode-se afirmar que, após algumas horas, D_1 detectaria

- (A) todos os fótons emitidos.
- (B) a grande maioria dos fótons emitidos.
- (C) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
- (D) uma pequena minoria dos fótons emitidos.
- (E) nenhum dos fótons emitidos.

14. Suponha que, ainda em regime monofotônico, o espelho semi-refletor S_2 fosse retirado do experimento. Pode-se afirmar que, na ausência de D_0 , após algumas horas, D_1 detectaria

- (A) todos os fótons emitidos.
- (B) a grande maioria dos fótons emitidos.
- (C) aproximadamente metade dos fótons emitidos.
- (D) uma pequena minoria dos fótons emitidos.
- (E) nenhum dos fótons emitidos.

15. Se no arranjo experimental descrito no enunciado (ausência de D_0 e presença de S_2) a fonte emitisse um único fóton, pode-se afirmar que

- (A) o fóton seria detectado com certeza em D_1 .
- (B) o fóton seria detectado com certeza em D_2 .
- (C) a metade do fóton seria detectada em cada detector simultaneamente.
- (D) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado em D_1 ou em D_2 .
- (E) o fóton não seria detectado em D_1 nem em D_2 .

16. Suponha que um único fóton seja lançado para o interior do interferômetro, montado segundo o arranjo experimental descrito na questão anterior (questão 15). Se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado entre E_1 e S_2 (caminho A) num instante posterior à passagem do fóton por S_1 e anterior à sua reflexão subsequente, pode-se afirmar que

- (A) o fóton seria detectado com certeza em D_1 .
- (B) o fóton seria detectado com certeza em D_2 .
- (C) a metade do fóton seria detectada em cada detector simultaneamente.
- (D) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado em D_1 ou em D_2 .
- (E) o fóton não seria detectado em D_1 nem em D_2 .

GABARITO

- | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 01) A | 02) C | 03) A | 04) B | 05) E | 06) B | 07) D | 08) D |
| 09) B | 10) C | 11) D | 12) A | 13) C | 14) C | 15) A | 16) D |

Apêndice B – Roteiro para a exploração do IMZ virtual

Caminho dos feixes do laser

1. Com o *software* aberto, selecione a opção **Português** no campo de opções **language** (no canto inferior direito do painel de opções).
2. Em **Ponto de Vista** (canto superior direito do painel de opções), clique na opção **Vista Superior** e, a seguir, marque a caixa de seleção **Ver Feixes**. i) Descreva o que ocorre com o feixe do laser desde o instante em que é emitido pela fonte até o momento em que o mesmo é projetado em cada um dos anteparos.
3. Desmarque a caixa de seleção **Ver Feixes** e, a seguir, clique na opção **Reiniciar Vista**.
4. Em **Instrumentos** (canto inferior esquerdo do painel de opções), desmarque a caixa de seleção **Espelho Semi-refli. 2**. Em seguida, em **Fonte** (centro do painel de opções) marque a caixa de seleção **Laser**. Arraste o MOUSE até a fonte do laser e clique no botão amarelo (liga). i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?

Polarização dos feixes do laser

5. Em **Instrumentos**, marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 1**, digite 90 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?
6. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 2**, digite 45 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?
7. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 3**, digite 90 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?

Interferência em regime clássico

8. Arraste o MOUSE até a fonte do laser e clique no botão verde (desliga). Retire os três polaróides (desmarcando as caixas de opções correspondentes) e recoloque o segundo semi-espelho marcando a caixa de seleção **Espelho Semi-refli. 2**. Ligue a fonte do laser. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?
9. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 1**, digite 45 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?

10. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 2**, digite 90 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?
11. Digite 135 no campo de opções **Ângulo** correspondente ao **Filtro Polaróide 2** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?
12. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 3**, digite 90 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?

Interferência em regime quântico

13. Desligue a fonte do laser e retire o segundo semi-espelho e os três polaróides (desmarcando as caixas de opções correspondentes). Em **Fonte**, marque a caixa de seleção **Fótons Únicos** e digite 1 no campo de opções **Fótons/Segundo**. Em **Instrumento**, marque a caixa de seleção **Detectores 3 e 4**. Ligue a fonte. i) O que se observa em cada um dos detectores? ii) Por que obtemos este padrão?
14. Acompanhe a contagem de fótons emitidos pela fonte no quadro **NÚMERO DE FÓTONS** e compare com o número de fótons coletados em cada detector. i) Por que obtemos esse padrão? Clique no botão **Acelerar!** “cinco” vezes e compare novamente a contagem de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons coletados em cada detector.
15. Desligue a fonte do laser e clique no botão **Reiniciar**. Em **Instrumentos**, marque a caixa de seleção **Espelho Semi-refli. 2** e ligue a fonte do laser novamente. i) O que se observa em cada um dos detectores? ii) Por que obtemos este padrão? Clique no botão **Acelerar!** “cinco” vezes e compare novamente a contagem de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons coletados em cada detector.
16. Desligue a fonte do laser e clique no botão **Reiniciar**. Em **Instrumentos**, marque a caixa de seleção **Anteparos 1 e 2** e ligue a fonte do laser novamente. i) O que se observa em cada um dos anteparos? Clique no botão **Acelerar!** “dez” vezes. ii) Por que obtemos este padrão?
17. Em **Instrumentos**, marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 1**, digite 45 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. Acompanhe a contagem de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons coletados em cada anteparo. Clique no botão **Acelerar!** “dez” vezes. e compare novamente a contagem de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons coletados em cada anteparo.
18. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 2**, digite 135 no campo de opções **Ângulo** e tecle ENTER. Acompanhe a contagem de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons coletados em cada anteparo. Clique no

botão **Acelerar!** “dez” vezes. i) O que se observa em cada um dos anteparos?
ii) Por que obtemos este padrão?

19. Marque a caixa de seleção **Filtro Polaróide 3**, digite 90 no campo de opções **Ângulo** e tecla ENTER. Acompanhe a contagem de fótons emitidos pela fonte com o número de fótons coletados em cada anteparo. Clique no botão **Acelerar!** “vinte” vezes. i) O que se observa em cada um dos anteparos? ii) Por que obtemos este padrão?

20. Em **Fonte**, Marque a caixa de seleção **Laser** e compare com os resultados do item 19.

Apêndice C – Avaliação referente às atividades com o IMZ virtual

Em relação ao item 2 do roteiro exploratório

1.a) Quais são os caminhos percorridos pelo feixe desde o instante em que é emitido pela fonte até o momento em que o mesmo é projetado em cada um dos anteparos?

1.b) O que ocorre com a intensidade do feixe desde o instante em que é emitido pela fonte até o momento em que o mesmo é projetado em cada um dos anteparos?

2) Em relação ao item 4 do roteiro exploratório, qual a relação entre a intensidade do feixe emitido pela fonte e a intensidade do feixe projetado em cada um dos anteparos?

3) Em relação ao item 5 do roteiro exploratório, qual é a direção de polarização do feixe emitido pela fonte? Como você chegou a essa conclusão?

Em relação ao item 6 do roteiro exploratório

4.a) Porque a intensidade do feixe projetado no anteparo 1 diminui?

4.b) Supondo que a intensidade do feixe emitido pela fonte seja I_0 , qual a intensidade do feixe de laser projetado no anteparo 1?

5) Em relação ao item 7 do roteiro exploratório, qual a intensidade do feixe projetado no anteparo 1?

Em relação ao item 8 do roteiro exploratório

6.a) Por que os feixes projetados no ponto central do anteparo 1 estão em fase?

6.b) Por que os feixes projetados no ponto central do anteparo 2 estão fora de fase?
(Dica: analise os caminhos percorridos pelo feixe)

7) Em relação ao item 11 do roteiro exploratório, por que não obtemos um padrão de interferência nos anteparos?

Em relação ao item 12 do roteiro exploratório

8.a) Por que voltamos a obter um padrão de interferência no anteparo 1?

8.b) Porque o mesmo não ocorre no anteparo 2?

Em relação ao item 13 do roteiro exploratório

9.a) É possível inferir o caminho percorrido pelo fóton? Explique.

9.b) O fóton é capaz de se dividir? Explique.

10) Em relação ao item 14 do roteiro exploratório, o que se pode afirmar acerca do número de fótons coletados em cada detector?

Em relação ao item 15 do roteiro exploratório

11a) É possível inferir o caminho percorrido pelo fóton? Explique.

11b) Como você explicaria o padrão de interferência observado para fótons únicos?

12) Em relação ao item 17 do roteiro exploratório, como você explicaria a diminuição do número de fótons coletados pelos anteparos na presença de polaróides.