

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

UMA INVESTIGAÇÃO DOS *DRIVERS* E
REPRESENTAÇÕES MENTAIS PRESENTES NAS
INTERPRETAÇÕES PRIVADAS DE ESTUDANTES DE
MECÂNICA QUÂNTICA: um estudo pela técnica *Report*
Aloud

ROBSON TREVISAN



Canoas, 2020

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL

PRÓ-REITORIA ACADÊMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E

MATEMÁTICA



ROBSON TREVISAN

**UMA INVESTIGAÇÃO DOS *DRIVERS* E REPRESENTAÇÕES
MENTAIS PRESENTES NAS INTERPRETAÇÕES PRIVADAS DE
ESTUDANTES DE MECÂNICA QUÂNTICA: um estudo pela técnica
*Report Aloud***

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Luterana do Brasil, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ensino de Ciências e Matemática.

Orientador: Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto

Canoas, 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP

T814i Trevisan, Robson.

Uma investigação dos *drivers* e representações mentais presentes nas interpretações privadas de estudantes de mecânica quântica : um estudo pela técnica *Report Aloud* / Robson Trevisan. – 2020.
359 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Luterana do Brasil, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Canoas, 2020.
Orientador: Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto.

1. Ensino de física. 2. Mecânica quântica. 3. *Report Aloud Storyboards*. 4. Teoria da mediação cognitiva. 5. Modelização científica. I. Andrade Neto, Agostinho Serrano. II. Título.

CDU 372.853

Bibliotecária responsável – Heloisa Helena Nagel – 10/981

ROBSON TREVISAN

UMA INVESTIGAÇÃO DOS *DRIVERS* E REPRESENTAÇÕES MENTAIS
PRESENTES NAS INTERPRETAÇÕES PRIVADAS DE ESTUDANTES DE
MECÂNICA QUÂNTICA: um estudo pela técnica *Report Aloud*

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Luterana do Brasil, como requisito à obtenção do título de Doutor em Ensino de Ciências e Matemática.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto – Orientador

Prof. Dr. Paulo Vinícius dos Santos Rebeque

Prof. Dr. Jeferson Fernando de Souza Wolff

Prof. Dr. Paulo Tadeu Campos Lopes

Prof. Dr. Rossano André Dal-Farra

Canoas, 2020

AGRADECIMENTOS

A minha Família, pelo incentivo, compreensão, apoio, carinho e paciência.

Ao meu orientador Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto, pela competência, determinação e sabedoria com que soube me conduzir ao longo desta pesquisa, sem seu apoio não teria tido êxito.

Aos professores doutores Paulo Vinícius dos Santos Rebeque, Jeferson Fernando de Souza Wolff, Paulo Tadeu Campos Lopes, Rossano André Dal-Farra por terem aceitado fazer parte da banca examinadora e pelas suas valiosas contribuições para este trabalho, o meu muito obrigado.

Ao Curso de Física da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA) – Campus Canoas e ao Curso de Física do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Bento Gonçalves, bem como às pessoas com quem convivi nesses espaços ao longo desta experiência.

Aos amigos, pelo apoio e carinho extraordinários ao longo de toda caminhada.

Aos colegas do grupo de pesquisa, pelas discussões e pelo auxílio em todas as etapas da pesquisa.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIM) - ULBRA que desempenharam um papel fundamental em minha formação acadêmica e pessoal.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio no subsídio desta pesquisa.

A minha companheira Camila Barili, por todo incentivo, carinho e por não medir esforços nos diversos momentos em que revisamos o texto desta tese. Sem ela, eu não teria chegado até aqui.

RESUMO

A presente tese investiga os *drivers* e as representações mentais adquiridas e/ou modificadas por licenciandos em Física ao longo do processo de compreensão conceitual dos resultados observados nos experimentos da dupla fenda e do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IMZ) após as instruções didáticas conduzidas pelas bancadas virtuais e *storyboards* com ilustrações conceituais representativas. Para tanto, escolhemos como conteúdo de conhecimento o comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética, tópico fundamental em disciplinas introdutórias de Mecânica Quântica (MQ). A condução da investigação converge e culmina com o estabelecimento de uma relação entre as interpretações privadas dos estudantes com as principais correntes interpretativas da MQ. Diante disso, adotamos a harmonização de dois referenciais teóricos, a Teoria da Mediação Cognitiva (TMC), responsável por abordar como a mediação por mecanismos externos de processamento extracerebral modifica a estrutura cognitiva dos alunos, sobretudo a mediação de cunho hipercultural, e a Modelização Científica de Mario Bunge, em virtude de sua percepção acerca da construção de conhecimento de forma racional em meio à interpretação da realidade. Os resultados foram obtidos após as análises realizadas sob os testes e a partir das linguagens verbal e gestual obtidas com imagens de vídeo gravadas durante duas sessões de entrevistas, conduzidas de acordo com o método “*Report Aloud*”, sendo este delineamento metodológico um diferencial na pesquisa em ensino de ciências. Constatamos que as bancadas virtuais em conjunto com as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards* forneceram aos licenciandos possibilidades para analisar ontologicamente e epistemologicamente, de diferentes formas, um mesmo resultado empírico previsto pelo formalismo da MQ. Apesar desse resultado positivo, verificamos que as representações mentais empregadas principalmente nas explicações para a dupla fenda e IMZ em regime quântico com a presença de um observador, na sua maioria, são heranças das concepções clássicas e deterministas.

Palavras-chave: Ensino de Física. Mecânica Quântica. *Report Aloud*. *Storyboards*. Teoria da Mediação Cognitiva. Modelização Científica.

ABSTRACT

The present thesis investigates the drivers and the mental representations obtained or modified by Physics students through the process of conceptual comprehension of the results observed in the double-slit and Mach-Zehnder interferometer experiments after the didactic instructions conducted by the virtual stands and the storyboards with conceptual illustrations. To do so, we chose the content of knowledge of the dual behaviour of matter and the electromagnetic radiation, fundamental topics in introductory subjects of Quantum Mechanics (QM). The conduction of this investigation converges and culminates with the establishment of a relation between the private interpretation of students with the main theories of QM. In this connection, we adopted the harmonization of two theoretical references, the Cognitive Mediation Theory, responsible to approach the way the mediation by external mechanisms of extracerebral processing modifies the cognitive structure of the students, especially the hypercultural mediation, and the Scientific Models of Mario Bunge, due to his perception about the knowledge construction in a rational way among the interpretation of reality. The results were obtained after the analysis done through the tests and the verbal and gestural languages from the images taken from the videos recorded during the interviews, conducted accordingly to the method Report Aloud, a differential in the research of Science Teaching. We found that the virtual stands with the didactic instructions mediated by the storyboards provided to the graduate students possibilities to analyze ontologically and epistemologically, in different ways, the same empirical result predicted by the QM formalism. Despite this positive result, we found that the mental representations used in the explanations for the double-slit and Mach-Zehnder interferometer experiments in quantum regime with the presence of an observer are mostly inheritances of the classic and deterministic conceptions.

Key-Words: Teaching Physics. Quantum Mechanics. Report Aloud. Storyboards. Cognitive Mediation Theory. Scientific Models

SUMÁRIO

BREVE TRAJETÓRIA DO AUTOR E MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO.....	11
INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2.3 Organização do texto	21
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 A SISTEMÁTICA ADOTADA NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1.1 O curso de seleção das publicações.....	23
2.2 O QUE DIZEM AS REVISÕES DE LITERATURA ANTERIORES?	25
2.3 O PROSSEGUIMENTO DA REVISÃO DE LITERATURA	34
2.3.1 As concepções dos estudantes acerca da Mecânica Quântica	35
2.3.2 Estratégias metodológicas no ensino da Mecânica Quântica	40
2.4 COMO OS ESTUDOS ANTERIORES CONTRIBUÍRAM NA ESTRUTURAÇÃO DESTA INVESTIGAÇÃO?	48
CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	51
3.1 A TEORIA DA MEDIAÇÃO COGNITIVA	51
3.1.1 A Era Digital e o Surgimento da Hipercultura.....	52
3.1.2 Fundamentos da TMC	54
3.1.3 Máquinas virtuais internas: os “drivers”	58
3.1.4 Formas de mediação.....	59
3.1.5 A TMC sintetizada em um mapa conceitual.....	66
3.1.6 A TMC como aporte teórico na pesquisa em Ensino de Ciências	66
3.2 A MODELIZAÇÃO CIENTÍFICA DE MARIO BUNGE.....	68
3.2.1 Transposição didática dos modelos científicos	73
3.3 A TMC ASSOCIADA À MODELIZAÇÃO CIENTÍFICA: uma vantajosa sustentação teórica.....	75
CAPÍTULO 4 – AS BANCADAS VIRTUAIS E OS <i>STORYBOARDS</i>: o estudo conceitual da dualidade onda-partícula.....	78

4.1 O CENÁRIO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	78
4.2 AS MEDIAÇÕES RESPONSÁVEIS PELAS ATIVIDADES DIDÁTICAS.....	80
4.2.1 As Bancadas Virtuais	81
4.2.2 Os Storyboards	95
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA	111
5.1 O DIRECIONAMENTO À PESQUISA QUALITATIVA (INTERPRETATIVA)	111
5.2 O ESTUDO DE CASO COMO ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	115
5.2.1 O desenvolvimento de um estudo de caso	116
5.3 OS SUJEITOS PARTICIPANTES DA PESQUISA.....	125
5.4 PRODUÇÃO DE DADOS: OS INSTRUMENTOS RESPONSÁVEIS	128
5.4.1 Teste I	128
5.4.2 Guia de Atividades	131
5.4.3 Teste II	139
5.4.4 Teste III	142
5.4.5 Entrevistas	144
5.4.6 Consultando as representações mentais dos estudantes: a técnica <i>Report Aloud</i> na condução das entrevistas.	145
5.5 O EXPERIMENTO: A ESTRUTURAÇÃO DA NUANCE INVESTIGATIVA	147
5.5.1 Etapa I: Teste I	149
5.5.2 Etapa II: Atividade com os <i>softwares</i> computacionais	149
5.5.3 Etapa III: Teste II	151
5.5.4 Etapa IV: <i>Report Aloud</i> – Primeiro Momento	151
5.5.5 Etapa V: Instrução didática mediada por <i>storyboards</i>.	152
5.5.6 Etapa VI: Teste III.	155
5.5.7 Etapa VII: <i>Report Aloud</i> – Segundo Momento	156
5.6 A METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS DADOS	157
5.6.1 Análise da Linguagem Verbal e Escrita	157
5.6.2 Análise dos Gestos Descritivos	159
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	163
6.1 O MOVIMENTO DA ANÁLISE.....	163
6.2 SINOPSE DOS RESULTADOS LEVANTADOS	165
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO DUALISTA REALISTA – O LICENCIANDO AB9 COMO ALUNO REPRESENTATIVO.....	168
6.3.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz. 168	
6.3.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais	172

6.3.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.....	178
6.3.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.....	182
6.3.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.....	186
6.3.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.....	190
6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO ONDULATÓRIO (REALISTA) – A LICENCIANDA AA1 COMO ALUNA REPRESENTATIVA.....	195
6.4.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.....	195
6.4.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais.....	200
6.4.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.....	205
6.4.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.....	210
6.4.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.....	213
6.4.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.....	217
6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO CORPUSCULAR (REALISTA) - A LICENCIANDA AA2 COMO ALUNA REPRESENTATIVA.....	220
6.5.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.....	221
6.5.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais.....	224
6.5.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.....	230
6.5.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.....	233
6.5.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.....	236
6.5.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.....	240
6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO DUALISTA POSITIVISTA – O LICENCIANDO AB13 COMO ALUNO REPRESENTATIVO.....	243
6.6.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.....	244
6.6.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais.....	248
6.6.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.....	253
6.6.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.....	257
6.6.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.....	260
6.6.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.....	264
6.7 O QUE OS RESULTADOS NOS DIZEM?.....	269

CONSIDERAÇÕES FINAIS	275
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	279
ANEXOS	289
ANEXO A – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM, NOME E VOZ...	290
APÊNDICES	292
APÊNDICE A – GUIA DE ATIVIDADES I.....	293
APÊNDICE B – GUIA DE ATIVIDADES II.....	304
APÊNDICE C – TESTE I: IES “A”	313
APÊNDICE D – TESTE I: IES “B”	325
APÊNDICE E – TESTE II.....	337
APÊNDICE F – TESTE III	348

BREVE TRAJETÓRIA DO AUTOR E MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

Para esta seção de apresentação, na qual tratarei sobre o meu percurso acadêmico e intenções pessoais acerca da docência e pesquisa inclinada à área da Física, tomo a liberdade de conduzir o texto na primeira pessoa do singular.

Minha trajetória de vida estudantil e profissional iniciou a partir do estabelecimento de laços estreitos com a Física ainda no início do Ensino Médio. Os primeiros contatos formais com este componente curricular fizeram despertar em mim um apreço pela busca da compreensão dos fenômenos da natureza em seus aspectos mais amplos. Assim, no primeiro semestre de 2010, efetuei minha matrícula no curso de Licenciatura Plena em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Bento Gonçalves.

Ao longo da graduação, tive a oportunidade de ser bolsista do Programa de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID) com o ensejo de manter o foco na prática docente, que se deu através de projetos planejados e executados em escolas da rede pública. Neste momento, além do aperfeiçoamento quanto às ações como professor de física, foi possível realizar os primeiros contatos com a pesquisa acadêmica, momento em que desenvolvi a preocupação com o processo de ensino e aprendizagem dos conteúdos. Desta forma, além da atuação docente, passei a me interessar pela pesquisa em Ensino, sobretudo devido às inquietações surgidas diante da observação *in loco* de dificuldades de assimilação de conceitos físicos manifestadas pelos estudantes.

Dentro desta ótica, para o tema de pesquisa ser desenvolvido no trabalho de conclusão de curso, escolhi o fenômeno da dualidade onda-partícula, objeto de estudo fundamental da Física Moderna. Neste trabalho, apresentei uma proposta didático-experimental para buscar a inserção de tal assunto em aulas de ensino médio. Foi nesta etapa acadêmica que surgiu o interesse em pesquisar sobre o ensino e a aprendizagem de um tema central da MQ carregado de interpretações, que tem a perspicácia de proporcionar debates acalorados entre pesquisadores da área.

Assim, após a conclusão da licenciatura em Física, a pós-graduação tornou-se uma possibilidade concreta para a qualificação da formação acadêmica, na qual eu almejava aprimorar a práxis docente e direcionar estudos aprofundados na pesquisa em ensino/educação em Ciências, em especial na Física. Portanto, no primeiro semestre de 2014, ingressei no mestrado acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIM), na Universidade Luterana do Brasil (ULBRA).

No PPGECIM, vinculei-me à linha de pesquisa “Tecnologias de Informação e

Comunicação para o Ensino de Ciências e Matemática”. Desta forma, como característica do grupo de pesquisa, inclinei-me a investigar as influências do uso de uma ferramenta computacional (hipercultural) no processo de ensino-aprendizagem de um conteúdo da MQ, a dualidade onda-partícula. Para tanto, o referencial teórico adotado para leitura dos dados, igualmente característico do grupo de pesquisa, foi a TMC, de modo a explicar como a mediação pelo uso computador modifica a estrutura cognitiva dos estudantes. Também foi utilizada a ideia de perfil epistemológico Bachelardiano para relacioná-la com a postura epistemológica expressada pelos alunos.

Os desdobramentos da investigação me possibilitaram um amadurecimento no âmbito da pesquisa e um aprofundamento acerca das interpretações da MQ empregadas na compreensão do fenômeno da dualidade onda-partícula, sobretudo na análise dos experimentos da dupla fenda e do IMZ. Nesta perspectiva, uma corrente de resultados da dissertação mostrou que as bancadas virtuais, ainda que auxiliares na previsibilidade dos resultados, estabelecem lacunas interpretativas para o comportamento do objeto quântico. Na ocasião, para compreender o porquê deste hiato deixado pelos *softwares*, levantamos (eu e meu orientador) a hipótese de que os mesmos não apresentavam representações gráficas dos objetos quânticos (fóton ou elétron) fundamentadas em conjecturas teóricas de cunho conceitual e, portanto, não ofereceram uma forma de o estudante gerar representações mentais e *drivers* específicos como mecanismo de processamento externo auxiliar à cognição.

À vista disso, no primeiro semestre de 2016, ingressei no curso de doutorado do PPGECIM com a intenção de darmos prosseguimento às investigações do mestrado, mantendo o direcionamento da pesquisa no estudo da dualidade onda-partícula sob o ponto de vista interpretativo tanto no âmbito metodológico-didático, de nossa parte, quanto na manifestação da compreensão dos fenômenos observados na dupla fenda e no IMZ por parte dos licenciandos em Física.

Ao nos depararmos com o estado da arte acerca das instruções didáticas com foco conceitual/interpretativo e na análise de concepções sobre a dualidade onda-partícula, reforçamos nossa percepção a respeito da necessidade de delinear um estudo com solidez teórica e metodológica que possibilitasse não só o emprego de instruções didáticas carregadas de representações conceituais, mas também uma análise qualitativa do estabelecimento dos licenciandos em correntes interpretativas no momento de revelar as suas compreensões dos resultados experimentais das diversas configurações da dupla fenda e do IMZ.

Em suma, foi este breve cenário apresentado que me trouxe até aqui. O capítulo Introdução, a seguir, contará com mais detalhes os movimentos propostos para a construção desta tese.

INTRODUÇÃO

As experiências cotidianas e os cursos introdutórios da física clássica promovem perspectivas realistas compostas pela localidade e um significativo determinismo dos fenômenos da natureza aos alunos. No entanto, o desenvolvimento da Mecânica Quântica (MQ), tomando bases rigorosamente científicas no início do século XX, não só levou os cientistas a impasses em relação às teorias bem estabelecidas na época devido à incorporação do indeterminismo, da probabilidade e da não-localidade para os fenômenos físicos, como também alterou expressivamente o modo científico de pensar.

A Teoria Quântica (TQ) é tida como uma teoria sólida e de sucesso, pois suas previsões têm sido corroboradas experimentalmente ao longo dos séculos XX e XXI com grande precisão. Mesmo diante desse cenário, “[...] é notável, no entanto, que a MQ tenha dezenas de interpretações diferentes. Ou seja, mesmo havendo concordância sobre o formalismo da teoria, não há consenso sobre o que ela diz em relação à realidade” (PESSOA JR., 2008, p.32).

O extenso reconhecimento da expressão da MQ em tecnologias atuais e seu papel na formação científica e na cultura da ciência, até mesmo pela crescente apropriação da MQ para misticismos de toda a espécie que dissemina informações oriundas de uma pseudociência por meio de uma “pressão social” (HILGER; MOREIRA, 2013), têm acentuado a investigação de vastas formas de apresentar o assunto em cursos introdutórios de Física Moderna (FM) em diversos níveis de ensino. “As dificuldades interpretativas dessa teoria dizem respeito tanto à forma pela qual a teoria se relaciona com os fenômenos quanto ao delineamento de uma ontologia que lhe seja apropriada” (OSTERMANN; PRADO, 2005, p.194).

Na literatura dirigida ao ensino de Física, encontra-se um número relevante de resultados que apontam dificuldades de alunos de ensino médio, graduação e pós-graduação em Física, no aprendizado de conteúdos medulares da MQ, sendo que uma considerável parte desses obstáculos vinculam-se a uma compreensão conceitual inconsistente no entendimento dos fenômenos quânticos fundamentais, muito devido a sua natureza não intuitiva e abstrata (FISCHLER; LICHTFELDT, 1992; JOHNSTON; CRAWFORD; FLETCHER, 1998; MASHHADI; WOOLNOUGH, 1999; MÜLLER; WIESNER, 1999; IRESON, 2000; SINGH, 2001; MANILLA; KOPONEN; NISKANEN, 2002; OLSEN, 2002; MONTENEGRO; PESSOA JR, 2002; PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009; WUTTIPIROM et al., 2009; AKARSU, 2010; BAILY; FINKELSTEIN, 2010; MCKAGAN; PERKINS; WIEMAN, 2010, AYENE; KRIEK; DAMTIE, 2011; ZHU; SINGH, 2012; MARSHMAN; SINGH, 2015, BAILY; FINKELSTEIN, 2015; MALGIERI; ONORATO; DE AMBROSIS, 2017; MARIÉS;

SAYER; SINGH, 2017, TREVISAN; SERRANO, 2018). Essas dificuldades conceituais/interpretativas geralmente aparecem mesmo quando os alunos adquirem com sucesso as habilidades procedimentais, de modo que, em alguns casos, são capazes de resolver problemas tradicionais da MQ que exijam o formalismo matemático, mas não respondem a questões fundamentais e qualitativas sobre o comportamento dos objetos quânticos em sistemas básicos (KIZILCIK; YAVAS, 2016). Montenegro e Pessoa Jr (2002) ressaltam que, em cursos típicos de graduação, espera-se que o aluno utilize a teoria quântica em algoritmos de resolução de problemas e, quando a desenvolve com sucesso, é aprovado na disciplina. Entretanto, para obter êxito nos cálculos, o aluno usualmente busca imaginar representações do mundo físico em sua mente, as quais os autores apontam ser representações que vão além das observadas nos laboratórios; o aluno imagina “partículas como bolinhas, imagina onda se propagando, imagina um microscópio de raios gama, etc.” (MONTENEGRO; PESSOA JR, 2002, p. 1).

Nessa ótica, um importante exemplo a ser enfatizado é o estudo da dualidade onda-partícula, na qual a carga conceitual e as correntes interpretativas são essenciais na resolução e compreensão do fenômeno em diversos contextos e arranjos experimentais (PESSOA JR, 1997; OSTERMANN; PRADO, 2005; AYENE; KRIEK; DAMTIE, 2011 CHEONG; SONG, 2013; BAILY; FINKELSTEIN, 2015; MARIES; SAYER; SINGH, 2017), principalmente no aparato experimental da dupla fenda, que, de acordo com Feynman, Leighton e Sands (2008), é um fenômeno absolutamente impossível de se explicar classicamente e contém em si o coração da Física Quântica (FQ).

Em seu estudo sobre o desenvolvimento e a validação das *Quantum Interactive Learning Tutorials* (QuILTs), Singh (2008) reforça a importância de ferramentas computacionais que possibilitem a visualização de experimentos virtuais e auxiliem o aluno na sua construção particular dos conceitos quânticos, mantendo-o envolvido no processo de aprendizagem. A autora ainda ressalta o *feedback* apropriado dado pela ferramenta após a previsão de uma situação particular e as tentativas de preenchimento de um hiato entre o formalismo quantitativo abstrato da MQ e a compreensão qualitativa necessária para explicar e prever diversos fenômenos físicos.

Prosseguindo nesta direção, vale mencionar os *softwares* sob a forma de experimentos virtuais que representam o IMZ e o experimento da Dupla Fenda, constantemente presentes em pesquisas que abrangem instruções didáticas direcionadas ao ensino da MQ (MÜLLER; WIESNER, 2002; SINGH, 2008; PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009; KOHNLE et al., 2015; MARSHMAN; SINGH, 2016; MARIES; SAYER; SINGH, 2017; TREVISAN; SERRANO, 2018).

Contudo, em um estudo recente (TREVISAN, 2016), verificamos que as bancadas virtuais não se mostraram eficazes para uma nova aquisição de *drivers*¹ e modelos mentais microscópicos que pudessem contribuir para o processamento imagístico cerebral, pois os *softwares* não fornecem estimativas de possíveis representações do objeto quântico ao longo do *setup* experimental, essa é uma das características dos “experimentos virtuais” em contraponto às “simulações conceituais” (DOERR, 1997). Enquanto o segundo se permite apresentar representações conceituais utilizadas pelos cientistas – bem como o que ocorre macroscopicamente em um experimento –, o primeiro se limita a apresentar unicamente o que é observado em um experimento.

Em virtude do panorama estabelecido, e de acordo com a sinalização de Bailly e Finkelstein (2015), na qual defendem mais ênfase em fornecer aos alunos mecanismos conceituais e linguísticos para identificar e articular suas próprias intuições e crenças sobre o mundo microscópico, nosso movimento de estudo dirigiu-se à construção e investigação do emprego de uma atividade didática orientada ao ensino da dualidade onda-partícula, com destaque para a compreensão conceitual e o reconhecimento das principais correntes interpretativas na análise do comportamento do objeto quântico (fóton e elétron) ao longo do *setup* experimental da Dupla Fenda e do IMZ.

Portanto, em nossa pesquisa de doutoramento, damos continuidade às investigações realizadas no mestrado (TREVISAN, 2016) e mantemos a preocupação com a abordagem conceitual em disciplinas introdutórias de MQ. Ademais, o principal desdobramento da pesquisa se estende na justificativa e no incentivo de fomentar, em aulas, o uso de ferramentas psicofísicas, sociais, culturais e hiperculturais com representações microscópicas na ilustração dos fenômenos quânticos capazes de auxiliar o entendimento conceitual, possibilitar o estabelecimento dos estudantes nas principais correntes interpretativas da MQ e utilizá-las para resolver os problemas propostos.

A atividade didática é composta por *softwares* em forma de experimentos virtuais, que representam a Dupla Fenda e o IMZ, e materiais em formato de *storyboards*² como mediadores hiperculturais e socioculturais no ensino de MQ. Os *storyboards* apresentam um conjunto de

¹ Por ora, o leitor pode considerar que “*drivers*” são apresentados pela Teoria da Mediação Cognitiva como “máquinas virtuais” internas, que armazenam informações através da sua interação com mecanismos externos. Os *drivers* são acessados pelo cérebro.

² São organizadores gráficos, que podem ser constituídos por uma sequência de ilustrações ou imagens dispostas em uma sucessão previamente estabelecida, com o objetivo de sintetizar a visualização do *script* de um filme, uma animação ou uma situação arquitetada (em nosso caso, o comportamento do objeto quântico no arranjo experimental da dupla fenda). É uma espécie de roteiro desenhado em que seu *layout* gráfico pode lembrar uma história em quadrinho.

representações que, organizadas, configuram a construção dos modelos científicos alusivos às conjecturas de cada uma das quatro principais interpretações da MQ³ (PESSOA JR, 2006), buscando, assim, expor diferentes pontos de vista para a explicação dos resultados observados no arranjo experimental da dupla fenda. As sequências de representações foram desenvolvidas justamente para preencher a lacuna representacional do comportamento do mundo microscópico no *setup* experimental.

Desta forma, acreditamos que representações e ilustrações dos fenômenos quânticos, que respeitam os postulados das principais correntes interpretativas da MQ, possam preencher uma lacuna interpretativa e contribuir para a compreensão conceitual dos fenômenos quânticos tradicionais que manifestem a dualidade onda-partícula dos objetos quânticos. Levamos em consideração que um dos grandes argumentos da escola imagística de funcionamento da mente é que representações são cruciais para o processamento cerebral, porque apresentam informação condensada no auxílio à cognição (MOREIRA, 1996). A não presença de representações adequadas em nível microscópico pode, assim, dificultar uma evolução conceitual. Sobretudo no que concerne à teoria quântica, a qual apresenta diversas interpretações possíveis para um mesmo conjunto de fenômenos, é possível que fornecer representações e *drivers* microscópicos condizentes com essas diversas interpretações seja importante do ponto de vista didático.

Conforme sinalizam os resultados apresentados por Singh (2008), as visualizações de ilustrações dos fenômenos são importantes para que os alunos construam ligações entre os aspectos formais e conceituais da MQ. Assim, com as representações fundamentadas nas ideias das principais correntes interpretativas, acreditamos que as representações mentais construídas sejam abrangentes à compreensão da dualidade em diferentes sistemas quânticos, o que contribui, desta forma, para evitar a fragmentação dos conceitos básicos da MQ. Tomamos, desta maneira, como proposta de pesquisa na área de Ensino, o estudo da forma de aprendizado quando se utiliza, por mediação, de um mecanismo externo de processamento de informações – o computador e os conteúdos digitais com representações microscópicas.

Considerando o cenário arquitetado, justifica-se a utilização de *softwares* sob a forma de laboratórios virtuais e *storyboards* com representações específicas para estabelecer um ganho no processamento extracerebral⁴ de informações e permitir que o aluno se conecte a esses

³ São elas: Corpuscular (Realista), Ondulatória (Realista), Dualista Realista e a Dualista Positivista. Essa classificação ocorre de acordo com a referência principal adotada para toda elaboração do material didático. Para tanto, utilizamos as obras do físico e filósofo da ciência Osvaldo Frota Pessoa Junior, das quais, as mais consultadas foram de 1997, 2006 e 2008. Essas interpretações são apresentadas no capítulo 4.

⁴ Do ponto de vista da TMC (SOUZA, 2004), é o processamento de informações ocorrido em mecanismos externos auxiliares, por exemplo, uma simulação computacional processa um resultado para uma determinada situação experimental e o sujeito o acessa (ver capítulo 3).

mecanismos externos responsáveis pela mediação entre conhecimento/informação e aluno. Esses *softwares* também complementam as abordagens tradicionais de ensino, proporcionando ao aluno a visualização dos fenômenos quânticos do mundo simulado através de um processo de experimentação. Cabe ressaltar, a estimulação proporcionada pela interação aluno-simulador-*storyboards* potencializa a sua propensão em entender os conceitos apresentados.

Pelo fato de nossa investigação utilizar *softwares* em forma de bancadas virtuais e materiais em formato de *storyboards* como mediadores hiperculturais e socioculturais⁵ no ensino de MQ, optamos pela adoção da Teoria da Mediação Cognitiva (TMC) (SOUZA, 2004) como aporte teórico norteador, em razão da sua abordagem relacionada à mediação hipercultural, em especial mediante o uso de computadores. Também, adotamos como referencial filosófico e epistemológico a Modelização Científica de Mario Bunge (1974) na construção de representações dos fenômenos da dualidade no material didático, a ser apresentado aos licenciandos em Física. As convicções de Bunge para o problema dos modelos científicos têm recebido crescente reconhecimento, sendo empregadas em importantes análises e reflexões no Ensino de Ciências (PIETROCOLA, 1999; CUPANI; PIETROCOLA, 2002; WESTPHAL; PINHEIRO, 2004; BRANDÃO; ARAÚJO; VEIT, 2011; MOREIRA, 2014). Em nosso espírito educativo, defendemos que se deva propor o estudo da MQ por meio de métodos que proporcionem ao aluno criar representações mentais que o auxiliem no entendimento fenomenológico dos conceitos quânticos.

Nos desdobramentos propostos por esta investigação, optamos pela apropriação de métodos qualitativos para arquitetar e executar o processo de produção dos dados e para o movimento de análise e repercussão dos resultados. Estes foram obtidos após a exploração dos registros existentes nos instrumentos de produção de dados, sendo eles: questionários caracterizados como testes I, II e III, guias para condução de atividades com os *softwares*, imagens e áudios de vídeo das entrevistas semiestruturadas. As entrevistas foram conduzidas de acordo com o protocolo *Report Aloud* (TREVISAN et al., 2019), um dos diferenciais deste estudo. Esta técnica é responsável pela construção do ambiente axiomático para a análise da linguagem gestual descritiva, a partir da adaptação da metodologia oferecida pela linha de trabalhos de Monaghan e Clement (1999) e Stephens e Clement (2010). Desde já, declaramos

⁵ A TMC (SOUZA, 2004) considera como mediadores hiperculturais as ferramentas de cunho tecnológico que exigem do sujeito conceitos e habilidades do domínio da tecnologia da informação. Já o termo sociocultural é utilizado por nós para unir as mediações sociais e culturais propostas pela TMC, para remeter respectivamente a interação do sujeito com outros indivíduos e com símbolos e artefatos construídos culturalmente.

que esta pesquisa foi submetida para análise do Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos (CEP), tendo obtido sua devida aprovação (CAAE: 84401317.3.0000.5349).

No ensino e na aprendizagem da MQ, analisar os fatos empíricos e desenvolver o formalismo matemático não é suficiente. Betz (2014) reforça que é preciso ainda deter-se na questão da interpretação, envolver-se, então, com os seguintes questionamentos: o que as grandezas presentes nas equações representam? Como elas se relacionam com os dados que podem ser extraídos dos experimentos? Que visão do mundo físico pode-se construir a partir daí? Essas indagações têm sido debatidas frequentemente entre físicos e filósofos desde o surgimento da teoria, e vêm despertando um interesse crescente nesta última década, tanto no meio acadêmico dos especialistas quanto no público leigo (BETZ, 2014).

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Considerando a relevância e atual ascensão das tecnologias digitais (TD) nos ambientes e processos educativos, que destacam, sobretudo, o desenvolvimento e a utilização de bancadas virtuais e também reconhecem as potencialidades de instruções didáticas mediadas por *storyboards* conceitualmente representativos que inclinam-se a preencher possíveis lacunas interpretativas de *setups* experimentais virtuais, nossa proposta de investigação busca analisar a interpretação privada de conceitos quânticos relacionados à dualidade onda-partícula de licenciandos em Física quando se utilizam, por mediação, mecanismos externos de processamento de informações descritos pelas simulações computacionais e *storyboards* com representações específicas.

Em conformidade com esse cenário, despontamos a seguinte pergunta central de pesquisa:

O uso didático de mecanismos externos de mediação, com representações visuais específicas para o objeto quântico, construídas de acordo com suas principais interpretações, promove o estabelecimento do licenciando em fase final do curso de Física em uma corrente interpretativa da Mecânica Quântica?

No entanto, para respondê-la, faz-se necessário, primeiramente, responder as seguintes questões auxiliares:

Pergunta Auxiliar I: As representações específicas do objeto quântico, alusivas às quatro principais interpretações da MQ, são capazes de preencher as lacunas interpretativas que ocorrem após o uso de experimentos virtuais?

Pergunta Auxiliar II: Após observar a modelização, realizada sob perspectiva das quatro principais interpretações da MQ acerca da compreensão conceitual do experimento de dupla fenda, o estudante é capaz de transpor sua interpretação de escolha de forma autônoma e não solicitada para o IMZ?

Desta maneira, devemos investigar se, após as interações com as bancadas virtuais e *storyboards*, ocorrem mudanças e/ou aquisição de novos *drivers* e representações mentais na estrutura cognitiva do estudante, auxiliando-o no processamento de informações e desenvolvimento de uma interpretação privada para a compreensão do comportamento do objeto quântico nos arranjos experimentais da dupla fenda e do IMZ. Para que, assim, a partir desta verificação inicial, possamos examinar o possível estabelecimento do licenciando em Física em uma corrente interpretativa da MQ.

1.2 OBJETIVOS

Ao valorizar a importância da abordagem conceitual no ensino da MQ em disciplinas introdutórias e almejar o encontro de elementos que nos permitam construir uma resposta para os questionamentos centrais desta investigação, traçamos os seguintes objetivos que se apresentam a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar os *drivers* e as representações mentais adquiridas e/ou modificadas por licenciandos em Física ao longo do processo de compreensão conceitual dos resultados observados no experimento da dupla fenda e no IMZ após a interação com bancadas virtuais e *storyboards* com ilustrações conceituais representativas. Assim, nosso estudo apoia-se no propósito de verificar as concepções dos alunos acerca do fenômeno da dualidade onda-partícula e seu possível vínculo com mecanismos externos de mediação.

Por conseguinte, reforçamos a ideia de que as bancadas virtuais e os *storyboards* apresentar-se-ão como mecanismos externos de processamento de informação ao longo do processo de construção de conhecimentos relacionados à Teoria Quântica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar, por meio da linguagem verbal e não verbal (gestual), os *drivers* e as representações mentais empregadas pelos licenciandos em Física na resolução dos testes propostos.
- Verificar as possíveis modificações que tenham ocorrido na estrutura cognitiva dos estudantes após as atividades realizadas com os laboratórios virtuais e *storyboards*.
- Reconhecer as interpretações privadas manifestadas pelos estudantes ao externalizarem sua compreensão a respeito dos resultados fornecidos pelos *setups* experimentais da dupla fenda e do IMZ.
- Registrar as influências dos mecanismos externos de mediação na origem das representações mentais e *drivers* revelados pelos alunos.
- Analisar o processo de modelização científica acerca do comportamento do objeto quântico, sobretudo no *setup* experimental do IMZ a partir das articulações das representações mentais e *drivers* dos estudantes.
- Apurar os sinais de ocorrência da transposição para o IMZ, as representações conceituais e a tendência interpretativa construídas por meio da interação com os *storyboards* direcionados à dupla fenda.

1.2.3 Organização do texto

A presente tese divide-se em sete capítulos. No capítulo 2 (dois), será apresentada a revisão da literatura, com os principais trabalhos que antecederam e nortearam esta pesquisa, dando sustentação teórica e prática para a discussão do tema abordado.

No capítulo 3 (três), será descrito o aporte teórico: a TMC formulada por Souza (2004), e a Modelização Científica proposta por Bunge (1974), de modo a fornecer a base para a construção, o desenvolvimento, a aplicação e a interpretação dos dados coletados nesse trabalho de pesquisa.

No capítulo 4 (quatro), será exposto o aporte teórico físico conceitual, isto é, apresentar-se-á o tema da dualidade onda-partícula juntamente com as quatro principais interpretações da MQ, sob o plano de fundo dos *softwares* em forma de laboratórios virtuais e dos *storyboards*.

No capítulo 5 (cinco), serão abordados o método, os instrumentos e os materiais utilizados na coleta de dados, bem como a descrição do universo envolvido na experimentação durante a investigação.

No capítulo 6 (seis), serão tecidos as discussões e os resultados do experimento proposto por esta pesquisa. Buscamos definir as interpretações privadas dos estudantes com o propósito de analisar seus possíveis estabelecimentos, ainda que de forma incipiente, em uma das quatro principais correntes interpretativas da MQ. Neste tocante, nos atentamos para as possíveis influências dos mecanismos externos de mediação nas concepções dos licenciandos em Física.

No capítulo 7 (sete), serão apresentadas as considerações finais deste trabalho, assim como as perspectivas de futuros resultados e algumas considerações para novas pesquisas.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica com o propósito de construir o estado da arte responsável por nortear esta investigação. Inicialmente, tratamos a metodologia utilizada no processo de levantamento das obras. Na sequência, são apresentadas as correntes teóricas e metodológicas dos trabalhos elegidos, juntamente com o estabelecimento de relações entre a literatura pesquisada e os direcionamentos encaminhados por este estudo, a fim de distingui-lo e precisá-lo frente a obras afins.

2.1 A SISTEMÁTICA ADOTADA NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista o tema desta pesquisa, direcionada a investigar o ensino e aprendizagem de conteúdos fundamentais da MQ, como o fenômeno da dualidade onda-partícula, apresentamos, a seguir, uma revisão da produção acadêmica recente publicada entre os anos de 2016 a 2019, a qual contempla propósitos semelhantes ao nosso estudo. A escolha por esse período de publicações deve-se ao fato da já existência de relevantes revisões de literatura com semelhante cunho temático, como Greca e Moreira (2001), Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011), e Rocha, Herscovitz e Moreira (2017). Também pela revisão realizada em nossa pesquisa de mestrado (TREVISAN, 2016), na qual os estudos entre 2004 a 2014 foram contemplados. Desta forma, partiremos de uma análise sobre os achados e as considerações destes trabalhos e, em seguida, avançaremos com a apresentação das pesquisas dos últimos 4 anos.

2.1.1 O curso de seleção das publicações

A delimitação da consulta das obras seguiu filtros estabelecidos na fase de planejamento do estudo, além do limite temporal das publicações e da sistemática da construção do capítulo de revisão da literatura, determinamos outros três critérios necessários para a seleção destes trabalhos. O primeiro critério determinado foi a opção pela ferramenta de busca, a qual adotamos o Google Acadêmico⁶, cuja sua cobertura expandiu significativamente ao longo dos anos, o que a torna, segundo Halevi, Moed, Bar-Ilan (2017), uma poderosa base de dados de literatura acadêmica. Considerando, portanto, que o resgate das publicações científicas no

⁶ <http://scholar.google.com.br/>

Google Acadêmico abrange um domínio significativo da *web*, sua utilização como ferramenta de recuperação de literatura acadêmica é apropriada e viável para a construção de revisões bibliográficas (MEIER; CONKLING, 2008; CLERMONT; DYCKOFF, 2012; HALEVI; MOED; BAR-ILAN, 2017).

O segundo critério de seleção dos artigos é a restrição pela busca à associação de termos que personalizam o nosso estudo. O estabelecimento deste comando pretende atingir as seguintes propriedades da investigação:

- ✓ Ações didáticas para o ensino introdutório de MQ.
- ✓ Levantamento de concepções e interpretações de estudantes acerca da MQ.

Para tanto, os termos utilizados como base na condução da busca pelos trabalhos foram “*Teaching Quantum Mechanics*”, “*Learning Quantum Mechanics*” “*Understanding Quantum Mechanics*” “*Interpretations of Quantum Mechanics*” e “*Quantum Mechanics Concepts*”. As expressões foram escritas em inglês, visto que artigos escritos em língua portuguesa e espanhola normalmente reeditam as palavras-chave e resumos também na língua inglesa, logo, pesquisar em ambas as línguas pode ocasionar duplicidade de resultados.

Buscando manter a qualidade das obras consultadas e indexadas no corpo da revisão da literatura, delimitamos um terceiro critério, sendo este uma espécie de triagem de revistas científicas. Foram selecionados para análise e construção do estado da arte desta investigação apenas artigos publicados em periódicos avaliados como A1, A2 e B1 no Periódico *Qualis* CAPES⁷ direcionado à área de Ensino referente ao quadriênio 2013-2016.

Por fim, mediante a leitura do resumo de todos os trabalhos preliminarmente levantados, foram selecionados os artigos que apresentam afinidade ao propósito desta investigação. Sendo assim, os estudos inclinados às instruções didáticas e ao levantamento/análise das concepções de estudantes acerca da MQ foram escolhidos para compor a revisão de literatura.

A revisão de literatura, seguindo os critérios mencionados anteriormente, envolveu a consulta a artigos das principais revistas da área de ensino de física do Brasil e do exterior. São elas: *Physics Education*, *American Journal of Physics*, *Latin American Journal of Physics Education*, *Science Education*, *Science and Education*, *Research in Science and Technological Education*, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, *Investigações em Ensino de Ciências*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências e Ciência e Educação*. O levantamento dessa

⁷ Para acessá-lo, utilize o seguinte endereço:

<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>. Acesso em 12 de março de 2019.

gama de trabalhos resultou em uma amostra de quarenta e sete artigos (respeitando o filtro temporal 2016-2019).

Na seção seguinte, a partir dos trabalhos de Greca e Moreira (2001), Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011), Trevisan (2016), Rocha, Herscovitz e Moreira (2017), iniciaremos a estruturação do cenário de estudos que serviram como balizadores nos desdobramentos desta pesquisa.

2.2 O QUE DIZEM AS REVISÕES DE LITERATURA ANTERIORES?

Optamos por iniciar a construção da revisão de publicações a partir dos levantamentos de estudos anteriores que tiveram este mesmo propósito como motivação, de analisar essencialmente as obras relacionadas ao ensino e aprendizado de conceitos fundamentais da MQ.

Seguindo esse contexto, Greca e Moreira (2001) apresentam os resultados de uma revisão da literatura referente ao ensino de conteúdos introdutórios de MQ, com a consulta de artigos a partir de 1970 até o início dos anos 2000. Os trabalhos encontrados foram classificados em três grupos: artigos sobre concepções dos estudantes a respeito de conteúdos de MQ, trabalhos com críticas aos cursos introdutórios de MQ e estudos contendo propostas de novas estratégias didáticas. Os autores ressaltam que os artigos do primeiro grupo são escassos e aparecem principalmente nos periódicos da área de Ensino de Ciências. Os trabalhos incluídos no segundo grupo concentram-se fundamentalmente nos cursos introdutórios sobre o tema, tanto em nível básico quanto universitário. Já no conjunto de artigos do terceiro grupo, encontram-se as propostas de inserção dos tópicos específicos, de alterações didáticas e curriculares e inclusão de novas tecnologias, caracterizada especialmente pelos recursos computacionais.

Em relação às concepções dos estudantes acerca da MQ, com isso, os autores concluem que as pesquisas com este objetivo, de identificar como os estudantes compreendem os fenômenos e os conceitos descritos pela MQ, estavam tendo seu início de publicações. Os autores ainda apontam que os tópicos abordados eram restritos à estabilidade do átomo, ao comprimento de onda de De Broglie, à dualidade onda-partícula, ao Princípio de Incerteza, à quantização, a fótons e elétrons. Com isso, os autores ressaltam que algumas questões importantes não são devidamente contempladas, como a superposição de estados, ou o problema da medida.

A respeito da metodologia utilizada nesta categoria de artigos, Greca e Moreira (2001) apontam a predominância do uso de questionários compostos por perguntas abertas ou fechadas, ou questões conceituais. Ao tratarem dos resultados apresentados pelos artigos, os autores ressaltam que na maioria dos casos os conceitos quânticos abordados dificilmente são compreendidos pelos estudantes pesquisados, independente dos níveis e das modalidades de ensino e das diferentes comunidades. Outra constatação feita é de que nas pesquisas direcionadas aos estudantes universitários, se as questões centrais e fundamentais da MQ não forem explicitamente abordadas nos cursos introdutórios, depois, os cursos mais avançados não preenchem essa lacuna, isto é, as dificuldades iniciais não são em boa parte superadas.

A segunda categoria analisada pelos autores refere-se fundamentalmente aos cursos introdutórios de MQ. De acordo com os autores, os artigos deste conjunto são unânimes ao criticar a forma com que os conteúdos de MQ são abordados em sala de aula. No entanto, os aspectos centrais dessa ineficiência instrucional são discutidos e não apresentam a mesma concordância. Mesmo assim, os autores identificaram vários estudos que seguem a linha na qual as críticas são direcionadas à abordagem formal dos cursos introdutórios.

As considerações descritas para essa gama de trabalhos indicam problemas no ensino introdutório de conteúdos da MQ devido ao fato de, às vezes, serem apresentados com excessiva forma axiomática e, em outras vezes, em forma “quase-histórica”. Em geral, os autores perceberam que as críticas estão fundamentadas em constatações percebidas pelos próprios docentes ao observarem os seus estudantes e livros de texto. Os autores lembram que as pesquisas apresentadas na primeira categoria de artigos concordam com essas críticas, tendo em vista as dificuldades de compreensão de questões centrais descritas pela MQ, inclusive as apresentadas pelos alunos considerados bons.

A terceira e última categoria analisada diz respeito às propostas didáticas, nas quais, segundo os autores, circundam a pergunta central de “Como melhorar o ensino da MQ?”. Para essa classe, foram encontrados muitos estudos, com propostas variadas, tanto em nível de instrução, quanto as suas abordagens didáticas. Para a apresentação dos trabalhos, Greca e Moreira (2001) optaram em separá-los por níveis de instrução, comentando primeiramente as propostas direcionadas ao ensino médio e posteriormente as para o nível superior.

As propostas didáticas para o ensino médio foram enquadradas em quatro grupos de acordo com suas abordagens distintas. As abordagens de cunho “Histórico-filosófica”, que, segundo a definição dos autores, considera importante o ensino da MQ por fazer parte da herança cultural da ciência. Defendem que os alunos devam compreender as mudanças epistemológicas e culturais da MQ, e, para tanto, a melhor maneira é a introdução histórica,

com destaque para o estabelecimento de diferenças para os modelos e a forma de pensar da Física Clássica (FC).

O segundo grupo de abordagens está ligado ao estabelecimento de elos com a FC. De acordo com Greca e Moreira (2001), esses trabalhos defendem que as instruções didáticas comecem destacando os aspectos comuns entre a FC e a MQ, pois consideram que parte da dificuldade da compreensão dos conceitos introdutórios quânticos resulta da tendência de se enfatizar as diferenças e os contrastes entre a própria FC e MQ, fazendo com que, em muitos casos, o aluno desconsidere os conceitos clássicos relacionados.

A terceira corrente de abordagens conjectura com a apresentação da MQ sem elos com os conceitos clássicos, na qual deve-se evitar que os alunos busquem interpretar os fenômenos quânticos a partir dos conceitos clássicos, ressaltando as ideias singulares da descrição quântica. O quarto e último viés de ensino enfatiza a importância dos experimentos no processo de aprendizagem.

Ao final da análise das publicações a respeito das propostas didáticas dedicadas ao ensino médio, os autores tecem considerações nas quais apontam a dificuldade de eleger a abordagem de ensino mais adequada para a internalização de conceitos. Haja visto que os quatro segmentos salientam aspectos diferentes, originam resultados específicos, mas não unânimes. Outra diferença significativa entre as propostas é o tempo empenhado para cada atividade, que varia entre 12 e 80 horas-aula.

Neste sentido, de buscar avaliar as abordagens mencionadas, Greca e Moreira (2001) apontam outras duas dificuldades expressivas. A primeira trata da ausência, em geral, de discussão de um referencial teórico pedagógico na construção e realização das atividades, sobretudo no que as propostas entendem por aprendizagem. A segunda questão aponta que a maioria dos estudos apresenta avaliações que possam ser comparáveis. Ainda que essas investigações exponham, aparentemente, melhoria na aprendizagem, os autores chamam atenção para a não apresentação clara, em muitos casos, de quais são estes avanços cognitivos. Por último, ainda se tratando deste segmento, os autores destacam a diferença entre os países da Europa e dos Estados Unidos com o Brasil ao se tratar dos avanços do estudo de tópicos da MQ neste nível de ensino. Enquanto europeus e norte-americanos buscavam melhorias no ensino dos conteúdos já presentes nos currículos, no Brasil ainda se discutia a melhor forma de inseri-los de fato.

Ao tratar dos estudos dirigidos às propostas para o ensino de MQ nas disciplinas introdutórias dos cursos universitários, Greca e Moreira (2001) apresentam uma classificação distinta e com maior subgrupos que a apresentada para o EM, uma vez que esses trabalhos não

seguem abordagens pedagógicas tão definidas. O primeiro viés mencionado pelos autores é a “Abordagem Histórica”, em que o salto conceitual entre a percepção clássica do cotidiano e os formalismos da física quântica deve ser dividido em pequenos avanços com o estabelecimento de ligações com a FC.

O segundo eixo didático, chamado por Greca e Moreira (2001) de “Visão Filosófica”, remete à apresentação de outras interpretações da MQ, além da Ortodoxa / Copenhagen, ou a adotar a conduta de que não há interpretação. Um dos trabalhos apresentados pelos autores em sua revisão, o de Pessoa Jr (1997), também nos serviu como base para o planejamento das etapas desenvolvidas por nosso estudo. Para esse autor, um curso introdutório de MQ pode apresentar diferentes interpretações para o formalismo e resultado de experimentos quânticos, deixando para que os estudantes construam sua interpretação privada para tais eventos. O autor ainda considera como conceito fundamental da MQ o tema da dualidade onda-partícula, podendo ser estudado com experiências distintas, como o IMZ e a dupla fenda. Portanto, essa concepção de abordagem nos auxiliou na construção de todas as etapas⁸ das instruções didáticas desenvolvidas nesta investigação.

Outra abordagem elencada por Greca e Moreira (2001) é denominada “Particulista”, na qual os estudos consideram matéria e radiação com comportamento corpuscular, e que os fenômenos ondulatórios característicos em determinados arranjos experimentais são aproximações a nível macroscópico de um impacto aleatório de partículas regidas por uma dinâmica quântica intrínseca. Ainda há aquela denominada “Abordagem sobre tópicos específicos”, em que os pesquisadores discutem conteúdos específicos de cunho teórico ou experimental, e a investigação sobre a didática desses pontos particulares pode ser útil para a melhoria do ensino da MQ.

A quinta abordagem listada é a “Utilização de recursos computacionais”. Essa linha de proposta didática também se assemelha a que utilizamos no momento de construção das atividades de nosso estudo. Aqui, acentua-se a utilização de simulações computacionais, laboratórios virtuais e diversos outros programas como mediadores digitais para auxiliar os acadêmicos na assimilação de fenômenos quânticos fundamentais.

O sexto segmento de abordagens identificado pelos autores, remete a “Utilização de resultados de pesquisa sobre fundamentos da MQ”, isso quer dizer que os experimentos e seus resultados obtidos no período recente deva ser discutido explicitamente em sala de aula. Os trabalhos apontam, segundo Greca e Moreira (2001), a importância da exposição aos

⁸ Estas etapas são descritas ao longo do Capítulo 5.

estudantes, desde o início, de exemplos físicos introdutórios que exibam o mais claro possível os sinais do comportamento quântico.

Outro segmento de propostas didáticas observado pelos autores é chamado de “Cursos para estudantes de carreiras não-científicas”, no qual contempla trabalhos que buscaram ensinar tópicos de MQ para acadêmicos de cursos não relacionados à física, como por exemplo, alunos do curso de artes. O enfoque é exclusivamente conceitual, sendo abordados temas tradicionais e temas que possivelmente não aparecem nem em cursos mais avançados. Alguns exemplos de conteúdos são:

o efeito fotoelétrico, para introduzir a noção de quantização, o experimento da dupla fenda, desenvolvendo o Princípio de Incerteza, a função de onda, a interpretação probabilística, a ideia da equação de Schrödinger, a descrição quântica do átomo, como aplicação dos conceitos descritos anteriormente, os saltos quânticos, para introduzir o problema da medida, e o paradoxo EPR e o teorema de Bell, para a não-localidade (GRECA; MOREIRA, 2001, p. 49).

Os autores ressaltam que esses conteúdos geralmente são discutidos a partir de uma relação com experimentos que corroboram as previsões quânticas.

O último grupo apresentado por Greca e Moreira (2001) enquadra-se nas abordagens que circundam as “Propostas curriculares”. Ali, os autores evidenciam as propostas de mudanças na apresentação dos conteúdos de MQ em cursos introdutórios por meio de livros-texto bastante reconhecidos na área, como o terceiro volume das "*Feynman's Lectures on Physics*" (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008), em que o tema da dualidade onda-partícula e superposição de estados ganham bastante destaque. Ou o quarto volume do "*Berkeley Physics Course - Quantum physics*" (WICHMANN, 1971), que segundo Greca e Moreira (2001) introduz conceitos quânticos fundamentais com possibilidades de interpretação dos resultados experimentais, como os destinados aos espectros atômicos.

Em conclusão à seleção e análise dos artigos com propostas didáticas direcionadas aos cursos superiores, Greca e Moreira (2001) mencionam algumas ponderações semelhantes às propostas com foco para o ensino médio. A primeira é de que a maioria dessas propostas não adotam e apresentam explicitamente os referenciais teóricos de ensino e aprendizagem para fundamentação das abordagens. A segunda é de que novamente os testes realizados para avaliar as atividades não apresentam rigor adequado, em muitos casos, não deixam claro as possíveis evoluções cognitivas acerca do tema e de suas dependências.

Os autores ainda apontam que, apesar das diferentes vertentes de propostas, duas tendências são mais presentes: a discussão da abordagem conceitual em cursos introdutórios, e o uso dos resultados de pesquisa dos fundamentos da MQ, tanto em desdobramentos práticos

quanto experimentais. Por fim, Greca e Moreira (2001) percebem uma tendência de crescimento das utilizações de recursos computacionais, sobretudo na forma de simulações computacionais para o ensino da MQ.

A próxima revisão de literatura que apresentamos é a construída por Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011), a qual abrange publicações em periódicos nacionais e internacionais entre os anos de 1999 e 2009, todas dispostas de um tema geral comum de investigação, o Ensino de MQ. Os autores se basearam nos trabalhos de Ostermann e Moreira (2000) e Greca e Moreira (2001) para classificar em cinco categorias os artigos selecionados, são elas: propostas didáticas, implementações de propostas didáticas, análise curricular e crítica a cursos de MQ, estudos de concepções e análise teórica/epistemológica.

O primeiro grupo revisado por Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) é o que remete às “Propostas didáticas”, ou seja, trabalhos que discorrem sobre organizações de conteúdos para serem abordados em sala de aula. Os autores relatam alguns pontos semelhantes observados nos critérios utilizados ao longo das investigações, como o emprego de um referencial de aprendizagem/epistemologia, que, embora tenha aparecido em quatro dos onze artigos selecionados, três destes escritos pelo mesmo grupo de pesquisa ainda é considerado um número pequeno. Um resultado semelhante a esse também já tinha sido observado por Greca e Moreira (2001).

Em relação ao nível de ensino para qual as propostas estavam direcionadas, Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) encontraram apenas duas para o ensino superior e outras nove para o ensino médio, o que explicita a ênfase de se investigar a inserção de conceitos introdutórios de MQ na educação básica. Outro ponto observado pelos autores trata das publicações com ênfase na experimentação, três estudos que fizeram uso dessa abordagem mostraram potencialidades quanto à realização de experimentos sobre física moderna, até mesmo no EM.

Um ponto importante levantado por Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) é o aspecto de que oito das onze publicações enfatizam conteúdos da Teoria Quântica Moderna, enquanto apenas três destacam conteúdos relativos à Antiga Mecânica Quântica. Esse levantamento mostra-se importante, pois, de acordo com os autores, muitas concepções alternativas em MQ são próximas aos modelos que vigoraram durante o período da conhecida Antiga Mecânica Quântica. Por fim, os autores identificaram um menor número de publicações quando comparado ao levantamento obtido por Greca e Moreira (2001), aparentemente deveu-se ao motivo de que as propostas foram efetivamente testadas.

Neste tocante, o segundo grupo de artigos analisados enquadram-se na “Implementação de propostas didáticas” em sala de aula. Nesse conjunto, também são considerados os estudos

em que a proposta está presente no corpo do texto, mas que apresentam os resultados experimentais justificando sua aplicação didática a sala de aula. Nesta categoria, Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) encontraram vinte e cinco trabalhos, que reforçam justamente a ideia do crescimento de propostas didáticas efetivamente implementadas. Dentre as vinte e cinco publicações, vinte e uma foram aplicadas no ensino superior.

Um ponto positivo nessa categoria, indicado por Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011), é a utilização de referenciais teóricos pela grande maioria dos trabalhos, dezoito de vinte e cinco, para fundamentar a construção e os desdobramentos das instruções. A aula expositiva é a metodologia mais utilizada pelos autores para as instruções, seguida pela segunda mais frequente, a abordagem baseada em laboratórios virtuais. A combinação entre essas duas metodologias é a terceira corrente mais aplicada nas atividades didáticas. Dessa forma, as associações de aulas expositivas com laboratórios virtuais têm se mostrado um importante campo de pesquisa da área. Inclusive, esse viés metodológico se assemelha ao aplicado em nossas instruções didáticas, em que as aulas expositivas são mediadas pelas bancadas virtuais e pelos *storyboards*.

Reforçando o resultado já observado anteriormente, os conteúdos da Antiga Mecânica Quântica foram os menos explorados em apenas três publicações. Enquanto nas outras vinte e duas, os conteúdos da Teoria Quântica Moderna é que foram enfatizados.

A terceira categoria elencada por Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) remete ao “Estudo das concepções” tanto de estudantes quanto de professores acerca dos conteúdos da MQ. Na descrição dos estudos, eles foram separados em dois subgrupos, o primeiro, relaciona aos estudantes, e o segundo, trata das concepções dos professores.

Em termos de estruturação dos estudos, Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) verificaram que o objetivo principal na maioria dos trabalhos direcionados às concepções dos alunos é a construção e a validação de questionários, bem como a apresentação das possíveis concepções. Outros estudos apresentam apenas as concepções, oriundas de guias e questionários compostos por questões abertas e fechadas e entrevistas. Para a investigação das concepções de professores, apenas três publicações foram encontradas, das quais podemos verificar uma sondagem mais específica à viabilidade e à confiança do professor de física frente à inserção da MQ no EM.

A quarta categoria de trabalhos refere-se à “Análise curricular e críticas aos cursos introdutórios de MQ”, na qual se encontram estudos com análises curriculares no sentido de verificar a relevância dos conteúdos dentro do contexto no qual são ministrados. Neste grupo, também são incorporadas as críticas aos cursos introdutórios, tendo em vista a relação com o

currículo de uma forma geral, e abrange não somente uma listagem de conteúdos, mas também as metodologias de ensino.

Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) encontraram apenas quatro trabalhos com essas características. Três deles debatem a MQ no EM ao analisar e comparar os currículos de países europeus e alguns países desenvolvidos, e também ao investigar a estrutura de apresentação dos conteúdos de MQ nos livros didáticos. O trabalho restante, com enfoque no ensino superior, apenas evidencia a diferença entre os cursos de Física Moderna (Estrutura da Matéria em algumas universidades) e MQ.

A última categoria analisada é denominada “Análise teórica/epistemológica”, na qual são incluídas as discussões teóricas ou epistemológicas de apresentação do conteúdo, bem como suas implicações educacionais sob o ponto de vista dos referenciais adotados. Esse grupo é formado por quatro publicações. Destas, três utilizam diversos referenciais como Kuhn e Yves Chevallard para justificar a proposta de uma dada vertente adotada para a construção das unidades didáticas. O trabalho restante faz uso de uma fundamentação epistemológica para a elaboração de um texto didático possível de ser apresentado ao EM. Demais referenciais epistemológicos não foram explicitados.

Em ambas as revisões analisadas até o momento, percebemos a não preocupação com a sustentação teórica/epistemológica para a elaboração, execução e avaliação, de fato, das atividades ou dos estudos empregados. Acreditamos que essas investigações, em sua maioria, demandam a necessidade de uma teoria direcionada à aprendizagem, já que boa parte dos estudos se inclinam a propostas, implementações e/ou sondagens de concepções.

As próximas duas revisões serão apresentadas simultaneamente, tendo em vista os seus períodos semelhantes de abrangência das publicações. Enquanto Trevisan (2016) contempla os trabalhos entre os anos de 2004 e 2014, Rocha, Herscovitz e Moreira (2017) abarcam os artigos publicados nos anos de 2010 até 2016. Reforçamos que ambas as revisões foram realizadas de acordo com a mesma temática geral motivadora, o ensino de conceitos fundamentais da MQ.

No capítulo de revisão bibliográfica presente em nossa dissertação (TREVISAN, 2016), buscamos, a partir dos trabalhos consultados, classificá-los em dois grupos, de acordo com os objetivos da investigação: (I) Propostas de ensino da dualidade onda-partícula. (II) Levantamento de concepções e interpretações acerca da dualidade. Rocha, Herscovitz e Moreira (2017), no entanto, ampliaram a segmentação de análise dos trabalhos, enquadraram-nos em cinco categorias: propostas pedagógicas; propostas didáticas implementadas; estudos sobre concepções de estudantes ou professores acerca de tópicos fundamentais de Mecânica Quântica; análise de material didático; estudos sobre formação continuada.

Prezando pela afinidade de objetivos entre as categorias levantadas pelos autores e o propósito desta investigação, priorizaremos a apresentação dos resultados oriundos da análise dos artigos que se inclinam a abordar propostas pedagógicas, implementadas ou não, e aos resultados dos trabalhos que versam sobre as concepções dos estudantes a respeito dos conceitos fundamentais da MQ.

Em relação às propostas pedagógicas, Trevisan (2016) destacou numerosos trabalhos direcionados ao ensino superior. Sendo que um dos principais temas abordados nas propostas e implementações pedagógicas é a dualidade onda-partícula, explorada por meio dos experimentos de Stern-Gerlach, Dupla Fenda de Young e IMZ, sobretudo a partir das potencialidades das interações com as bancadas virtuais que simulam esses arranjos experimentais substanciais da MQ.

Em geral, o que fora observado, resultados efetivos das implementações, é o êxito dos alunos em alcançar uma diferenciação do objeto clássico com o objeto quântico. Além do despertar interesse nos acadêmicos sobre os fenômenos devido à preocupação conceitual apontada na grande parte das propostas. A interação com as bancadas virtuais tem se mostrado eficaz na previsão dos resultados teóricos, no entanto, ainda se observam resultados que indicam dificuldades interpretativas na compreensão desses fenômenos, a postura clássica ainda se mostra com relevante presença no entendimento e na explicação dos resultados.

Para essa mesma classe de estudos, Rocha, Herscovitz e Moreira (2017) também verificaram o pequeno número de propostas didáticas direcionadas ao ensino médio no período analisado, mas ressaltam a quantidade elevada de estudos que se preocupam com métodos de ensino da MQ, juntamente com a categoria de investigações empenhadas ao levantamento e à compreensão das concepções dos alunos.

Tratando-se de ferramentas e estratégias presentes nos trabalhos selecionados pelos autores, mantém-se os resultados que afluem para a tendência do emprego das tecnologias digitais, sobretudo na forma de simulações computacionais interativas. As considerações decorrentes das implementações das propostas são variadas, alguns exemplos são frequentes, como a relação positiva na evolução conceitual derivada de instruções mediadas por bancadas virtuais. Em contrapartida, lacunas interpretativas foram detectadas, mesmo após atividades didáticas específicas, isso muito devido à postura realista clássica construída ao longo da formação do educando, influenciados por diversos fatores, como livros didáticos, falas dos professores e materiais de divulgação científica que, de acordo com seus objetivos, podem perder o rigor conceitual na exposição dos conceitos.

Analisando o grupo de publicações destinadas a verificar as concepções dos estudantes acerca dos conceitos fundamentais da MQ, tanto Trevisan (2016) quanto Rocha, Herscovitz e Moreira (2017) apresentam estudos nos quais seus resultados se relacionam, convergindo para determinadas tendências de concepções.

O formalismo da MQ tende a ser alcançado com mais facilidade, pois, geralmente, quando os alunos desenvolvem os algoritmos de solução dos problemas, tendem a ser aprovados na disciplina, mesmo não possuindo uma compreensão conceitual adequada acerca dos aspectos matemáticos abstratos inerentes à teoria.

Demais resultados levantados apontam dificuldades dos estudantes na compreensão de conceitos, como a função de onda, processos de medição, valores esperados, princípio da superposição. Ademais, são apontados desfechos de que as representações sociais dos conceitos quânticos podem se tornar potenciais obstáculos epistemológicos (BACHELARD, 1996) na compreensão de conceitos cientificamente aceitos. Em relação às concepções dos professores de física, alguns resultados indicam uma imprecisão na compreensão de conceitos e princípios essenciais, como aos relacionados à natureza ontológica de partículas clássicas, luz e elétrons.

De modo geral, pode-se verificar que os estudantes se inclinam a uma postura clássica na interpretação da MQ. Um exemplo pode ser observado em Baily e Finkelstein (2010), no qual constataram que os alunos preferem a descrição do elétron como pacotes de ondas no experimento da dupla fenda e ainda assim acreditam na posição definida do elétron no átomo. Os autores ainda relataram que essa postura com direcionamento clássico ocorre geralmente quando os professores não abordam explicitamente as possíveis interpretações dos fenômenos fundamentais da MQ.

Em face desse cenário, descrito a partir das revisões de literaturas mencionadas, pode-se observar um panorama geral dos estudos dirigidos ao ensino e à aprendizagem de temas introdutórios da MQ publicados até o ano de 2016. Conforme mencionado no início deste capítulo, na próxima seção, daremos continuidade à revisão de literatura e buscaremos contemplar as publicações a partir de 2016 até 2019.

2.3 O PROSSEGUIMENTO DA REVISÃO DE LITERATURA

Tendo em vista os objetivos da nossa investigação e seguindo a metodologia descrita para a seleção dos artigos (ver seção 2.1.1), optamos por arrolar as publicações em dois grupos: (I) Propostas e implementações de estratégias didáticas para o ensino introdutório da MQ, e (II) Levantamento de concepções e interpretações de estudantes acerca da MQ.

A categoria (I) engloba trabalhos que apresentam levantamentos de concepções, interpretações, conhecimentos prévios e perfis conceituais de estudantes e professores acerca dos fenômenos principais da TQ. A categoria (II) refere-se à implementação, em sala de aula, ou a propostas de estratégias didáticas para o ensino de tópicos fundamentais da TQ, tanto para o nível superior quanto para a pós-graduação (formação continuada de professores).

Buscamos contemplar trabalhos relevantes das literaturas nacional e estrangeira com o intuito de conhecer e comparar as investigações do ramo, e utilizá-las como suporte teórico-metodológico em nossa pesquisa. É importante ressaltar, também, que a categorização descrita acima não é a única possível e que alguns dos trabalhos utilizados podem ser citados em mais de uma categoria. Não é o nosso objetivo, portanto, realizar qualquer análise crítica a respeito do material consultado.

Primeiramente, serão abordadas as contribuições atribuídas às concepções dos estudantes e, em seguida, as propostas e implementações de estratégias didáticas para o ensino introdutório da MQ.

2.3.1 As concepções dos estudantes acerca da Mecânica Quântica

Nos carece de sentido tratar apenas das concepções dos estudantes acerca dos fenômenos quânticos e não as relacionar com as possíveis causas responsáveis por tais conhecimentos, portanto, também serão exploradas aqui as prováveis inferências dos autores sobre os seus resultados, oriundos, na maioria das vezes, de instrumentos com questões de múltipla escolha. Nesta seção, promoveremos mais ênfase à linha de investigações orientadas ao estudo das interpretações dos acadêmicos diante dos fenômenos/objetos quânticos.

Os pesquisadores Kizilcik e Yavas (2016) desenvolveram um estudo no qual foram identificadas opiniões de professores de física em formação sobre dificuldades em introdução à física quântica. O estudo dos autores foi conduzido por vinte e cinco futuros professores de física, os quais foram entrevistados sobre aspectos da física quântica, codificados usando análise de conteúdo e divididos em categorias diferentes. Os cientistas tentaram revelar as opiniões dos professores que fizeram parte da pesquisa sobre as dificuldades em solucionar esses tópicos dados. Ao final do estudo, os autores concluíram que os participantes tiveram mais dificuldade na transição da física clássica para a física quântica, que foi evidenciado em tópicos de física quântica que requisitaram uma compreensão diferente, como radiação do corpo negro, dualidade onda-partícula da luz e princípio da incerteza. No entanto, o estudo mostrou que os participantes não tiveram dificuldades no que concerne cálculo matemático, sendo que

a abordagem baseada em visualização do tópico teve uma boa recepção por parte dos participantes.

No que diz respeito às dificuldades em interpretar o espectro atômico usando um modelo quântico de emissão e absorção de radiação, Savall-Aleman et al. (2016) identificaram essas dificuldades em seu estudo com alunos de ensino médio, professores e estudantes universitários no momento da explicação do espectro atômico. A metodologia dessa pesquisa consistiu em identificar conceitos-chave que qualquer modelo quântico pela emissão e absorção de radiação eletromagnética deve incluir para explicar pelo espectro de gás, além de aplicar dois questionários, um para professores e outro para estudantes. A conclusão a que os autores chegaram foi que faltou aos professores um modelo para a emissão e absorção de radiação eletromagnética capaz de explicar o espectro, além de que professores e estudantes dividiram as mesmas dificuldades e que essas dificuldades concernem ao modelo do átomo, ao modelo da radiação e ao modelo de interação entre eles.

Dini e Hammer (2017) realizaram um estudo de caso de estruturas epistemológicas de um estudante em mecânica quântica. Partindo da asserção de que pesquisas epistemológicas em cursos introdutórios destacam a importância da compreensão da física como um refinamento do pensamento cotidiano, os autores dizem que essa visão é difícil sustentar em mecânica quântica tanto para estudantes quanto para os próprios físicos. Por isso, na sua pesquisa, Dini e Hammer (2017) apresentam um estudo de caso de uma abordagem de um aluno de graduação e reflexões sobre aprendizagem durante dois semestres de mecânica quântica, com base em nove entrevistas. Os autores contam neste artigo sobre a mudança na epistemologia do clássico para o quântico e argumentam que seu sucesso na aprendizagem envolveu o enquadramento da matemática como expressão do significado físico. Ademais, os pesquisadores mostram que o estudante não foi totalmente estável nessas construções. Este caso, segundo os autores, dialoga com epistemologias dos estudantes, sobretudo em relação aos papéis do pensamento cotidiano e da matemática.

Ao perceber a necessidade de pesquisas sobre testes, falta de compreensão e estratégias de ensino devido sobretudo às diferenças entre a natureza conceitual de mecânica quântica e a física clássica, o estudo de Krijtenburg-Lewerissa et al. (2017) preenche essa lacuna ao apresentar uma revisão do atual estado de pesquisas em ensino de mecânica quântica na escola secundária e no início da graduação. Para isso, setenta e quatro artigos foram selecionados e analisados sob ótica da má compreensão, ferramentas de pesquisa, estratégias de ensino e aplicações multimídia e separados categoricamente por subtópicos em mecânica quântica.

Os resultados do estudo mostraram que os estudantes têm dificuldade em relacionar física quântica à realidade, além de que tópicos como ensino do comportamento complexo, dependência de tempo, superposição e medida do problema mal foram investigados nos níveis em questão. A pesquisa também revelou a necessidade de investigar a dificuldade dos estudantes no que diz respeito às funções das ondas e aos poços potenciais. E ainda, o estudo mostrou a existência de ideias diversas sobre estratégias de ensino em mecânica quântica e a necessidade de pesquisas acerca da promoção da compreensão. Os autores destacam a necessidade de mais pesquisas empíricas sobre as dificuldades estudantis, estratégias de ensino, atividades e ferramentas de pesquisas para uma melhor abordagem conceitual em mecânica quântica.

Considerando que valor esperado de um observável é um conceito importante em mecânica quântica, já que só se tem informação sobre a distribuição provável de medidas em um dado estado do sistema, Marshman e Singh (2017) consideram que graduandos em um nível mais elevado de estudo e estudantes de PhD em física têm dificuldades conceituais e procedimentais quando se trata de determinar o valor esperado de um observável físico em certo estado quântico, sobretudo no que se refere ao uso da noção Dirac. Portanto, em sua pesquisa, os autores descrevem essas dificuldades que os estudantes têm, e discutem como essas dificuldades foram usadas como guia no desenvolvimento de um tutorial interativo de aprendizagem quântica, no intuito de auxiliar estudantes a desenvolverem um bom domínio sobre o valor esperado. O tutorial fez com que estudantes integrassem as habilidades de compreensão conceitual e procedimental para desenvolverem uma compreensão coerente sobre o valor esperado.

A validação do tutorial mostrou que os estudantes cumpriram a tarefa significativamente melhor do que quando utilizada somente a instrução tradicional. Além disso, ao final do semestre de pesquisa em um curso de graduação em mecânica quântica em que o tutorial foi incorporado, muitos estudantes reportaram que o tutorial foi realmente efetivo em ajudar a compreender os conceitos.

Através da compreensão de que as atitudes docentes e as abordagens de ensino a estudantes de graduação em mecânica quântica podem ser úteis no desenvolvimento efetivo da aprendizagem dos estudantes, as autoras Siddiqui e Singh (2017) examinaram os resultados de uma pesquisa na qual doze membros do corpo docente de uma universidade refletiram sobre vários assuntos relacionados ao ensino e à aprendizagem de mecânica quântica na graduação. Os tópicos analisados foram: pensamentos dos professores sobre os objetivos de um curso em mecânica quântica, desafios gerais desse ensino, a preparação de estudantes para o curso, visão

sobre assuntos fundamentais e a dificuldade de ensino em certos tópicos, a reflexão do seu próprio ensino em mecânica quântica quando eles mesmos eram estudantes e quando eles ensinaram o conteúdo aos seus estudantes, e a incorporação de tópicos contemporâneos nos seus cursos.

Os resultados sintetizados pelas autoras mostram que a maioria dos instrutores utilizou aulas expositivas somente e alguns ainda foram céticos de que outra abordagem ajudaria melhor os estudantes a aprender mecânica quântica. Alguns dos professores complementaram suas aulas com experimentos, grupos de resolução de problemas, *quizes* de perguntas e respostas e testes conceituais para auxiliar os estudantes a desenvolver a compreensão conceitual. Vários professores ressaltaram que a aprendizagem de mecânica quântica é particularmente desafiadora para eles quando estavam na graduação e alguns deles perceberam que não ensinam da mesma forma como foram ensinados, porque eles não consideram aquela abordagem efetiva. Com esse estudo, as autoras esperam contribuir para pesquisas que resultem em desenvolvimento de ferramentas que melhorem a compreensão de estudantes em mecânica quântica.

Hilger et al. (2017) investigaram as representações sobre física quântica que permeiam o meio acadêmico em uma pesquisa comparativa entre universitários brasileiros e argentinos iniciantes em curso de engenharia. Para isso, os autores empregaram técnicas de Escalonamento Multidimensional partindo de dados obtidos pelo Teste de Associação Numérica de Palavras, elaboração de Quadro de Vêrges partindo dos dados obtidos pelo Teste de Associação Escrita de Palavras, para determinar elementos que compõem o núcleo e a periferia das possíveis representações sociais em questão.

Apesar de que os estudantes pertenciam a todo um contexto cultural, ideológico, social diferente, os autores reconheceram que eles dividiam características importantes comuns, como serem estudantes de engenharia, assistirem a aulas de Física Geral e Cálculo, e, por isso, fazerem associações similares no universo científico. Em um dos resultados, os autores revelam que, diferente de estudantes de ensino médio, os universitários participantes da pesquisa não tiveram influência de teorias quânticas alternativas, uma vez que associaram palavras pertencentes ao contexto em que responderam ao questionário, o contexto da aula de Física Geral para engenharia. Por isso, os pesquisadores consideram importante compreender o universo dos estudantes para fornecer subsídios para melhorar a prática pedagógica.

Marshman et al. (2017), preocupados com os poucos estudos que enfocam as práticas de classificação de professores assistentes em estágio introdutório e avançado de cursos de física, desenvolveram um estudo que investigou se graduandos em introdução à MQ utilizam

diferentes critérios e caso utilizam, porque o fazem. Para fazer uma investigação sobre possíveis discrepâncias em abordagem classificatória em cursos de diferentes níveis, os autores implementaram uma sequência de atividades instrucionais que exigiam soluções a problemas de introdução à MQ e exigiram também uma justificativa para a diferença de abordagem classificatória entre os dois contextos. Para isso, os autores realizaram entrevistas individuais, discussões em aula e respostas escritas. Ao final, os pesquisadores descobriram que a maioria dos professores assistentes classificaram as soluções aos problemas de mecânica quântica e introdução à física de forma diferente: em mecânica quântica, os professores assistentes focaram mais em conceitos físicos e raciocínio e penalizaram estudantes por não mostrarem evidência de compreensão. Os autores relacionam os resultados dessa pesquisa ao fato disso mostrar a necessidade de programas de desenvolvimento profissional para professores assistentes.

Ainda sobre o raciocínio em mecânica quântica, os pesquisadores Hoehn e Finkelstein (2018) examinaram o uso de ontologias por estudantes e o modo como os estudantes organizam categoricamente as entidades pelas quais raciocinam. Através da análise de três episódios de foco de discussão em física moderna com estudantes, os autores apresentam evidência da natureza dinâmica da ontologia. Os autores descobriram que, em um dado episódio de raciocínio, ontologias podem ser dinâmicas na construção (quando o raciocínio constrói as ontologias) ou na aplicação (quando as ontologias são aplicadas em um dado episódio de raciocínio). Em seus dados, os autores perceberam casos em que os alunos alternaram entre estruturas estáveis paralelas, além de construir e negociar novas ontologias no momento. Na pesquisa, foi usada uma estrutura conceitual coletiva como uma ferramenta analítica para capturar o raciocínio dos estudantes em grupos. Em suma, Hoehn e Finkelstein (2018) avaliam o raciocínio e argumentam que o raciocínio de forma experimental pode ser produtivo para os alunos que aprendem mecânica quântica.

Em um de seus estudos, Körhasan e Miller (2019) investigaram modelos mentais da dualidade onda-partícula de estudantes, com objetivo de apresentar uma útil e detalhada exploração de formulação de conceitos sobre teorias quânticas dos estudantes, para professores melhor compreenderem barreiras conceituais comuns em estudantes de introdução à física. A metodologia da pesquisa consistiu em entrevistar seis estudantes de engenharia em um curso de base de cálculo da física. Os autores conduziram um exame qualitativo das entrevistas e descobriram que os estudantes exibiram quatro modelos mentais diferentes: Modelo Quântico, Modelo Semi-Quântico, Modelo de Onda e Modelo Intermediário. Outro resultado que essa

pesquisa revelou foi que dois terços dos estudantes tiveram dificuldade em discriminar ideias clássicas e quânticas, e realizaram modelos mentais inconsistentes em contextos específicos.

Em sua pesquisa sobre dinâmicas de raciocínio ontológico em contextos de física quântica, Hoehn et al. (2019) partem da premissa que as ontologias que os estudantes usam, como o conceito sobre a natureza das entidades, impactam no modo como aprendem física e no modo como o seu raciocínio funciona. Assim, os autores investigaram a capacidade dos estudantes de serem flexíveis no uso de ontologias em contextos modernos de física, com enfoque no raciocínio sobre entidades duas quânticas (prótons e elétrons) para três tópicos em introdução à FQ (dupla fenda, IMZ e tunelamento quântico).

A metodologia da pesquisa consistiu em apresentar uma descrição detalhada sobre diferentes tipos de estruturas ontológicas dinâmicas, identificadas pelo raciocínio individual. Foram detectadas a unitária, paralela e misturada no conjunto de dados coletados, estruturas que foram aplicadas em ontologias específicas, como de onda ou partícula, por uma entidade específica, como próton ou elétron. Os autores demonstraram a utilidade da estrutura pela codificação das respostas individuais provenientes de uma amostra representativa de um curso de introdução à física. Além disso, Hoehn et al. (2019) apresentam padrões de uso de ontologias. O estudo mostrou que os estudantes usaram uma variedade de ontologias e suas estruturas em entidades e áreas, mesmo quando não foi explicitamente solicitado. Além disso, os autores descobriram que a escrita e a indução da pergunta impactaram no uso das ontologias.

2.3.2 Estratégias metodológicas no ensino da Mecânica Quântica

Nesta seção, nos inclinaremos à apresentação de propostas metodológicas direcionadas ao ensino de tópicos fundamentais da MQ, das quais desempenharemos mais atenção para as que tratam do uso de simuladores, assim como as de abordagens direcionadas à perspectiva conceitual.

Em seu artigo, De Ambrosis et al. (2016) expõem sobre processos de sequências de ensino e aprendizagem em FQ com base na soma de caminhos de Feynman. A sequência foi projetada levando em conta a perspectiva das “teorias da estrutura” na mudança conceitual, e teve como objetivo superar dificuldades reportadas na literatura de aprendizagem de elementos básicos da FQ. Nesse trabalho, a sequência foi primeiro testada no contexto de um curso de treinamento para professores, e os resultados mostraram que os estudantes foram capazes de alcançar uma linguagem de especialista em um curto período, assim como os testes escritos finais mostraram sinais claros de apropriação pelos estudantes da disciplina em questão.

Todavia, os testes mostraram algumas limitações no que diz respeito à compreensão dos estudantes sobre o princípio da incerteza. Além disso, os autores consideram que, tendo em vista um teste no ensino médio, a sequência tinha que ser expandida para as dimensões experimental e metacognitiva. E ainda, um número de análises quantitativas tiveram que ser expandidas para conectar o tratamento dado pelos autores com os exercícios presentes nos livros didáticos habituais. A versão final da sequência foi testada em estudantes de licenciatura e diretamente na aula no ano final de um ensino médio orientado para a ciência.

Os resultados dessa pesquisa mostraram que a abordagem da soma dos caminhos é eficaz para superar algumas das dificuldades educacionais no ensino de conceitos básicos da física quântica. No que diz respeito ao ensino do princípio da incerteza, a abordagem da soma dos caminhos não pareceu ser menos eficaz do que outros métodos. Esses resultados mostraram dados mais acurados do que os feitos em anos anteriores, contudo, não podem ainda ser considerados satisfatórios.

Brown et al. (2016), em sua pesquisa que se estendeu por quatro anos, descreveram o estudo no qual estudantes de graduação em nível superior em curso de mecânica quântica receberam quatro problemas idênticos em testes a médio prazo e em testes finais. Para aproximadamente metade dos estudantes foi dado incentivo a corrigir seus erros no teste a médio prazo. Nesses casos, os estudantes poderiam restaurar 50% dos pontos perdidos em cada problema. As soluções aos problemas de médio prazo foram providenciadas a todos os estudantes de ambos os grupos, mas àqueles que corrigiram seus erros foi providenciada a solução após as correções. O desempenho nos mesmos problemas, no teste final, sugeriu que os estudantes a quem se deu incentivo de corrigir seus erros significativamente superaram aqueles a quem não foram incentivados. Sendo assim, o incentivo à correção teve grande impacto na performance do exame final em estudantes que não tiveram um bom desempenho no teste a médio-prazo.

Ainda considerando a importância do *feedback* para a aprendizagem, Sayer et al. (2016) investigaram a efetividade do ensino da abordagem *Just-in-Time Teaching* (ensino sob medida), que incluiu testes conceituais em sala de aula usando *clickers* em um curso de mecânica quântica. Os autores analisaram o desenvolvimento na pré-leitura de *quizes*, em questões *clicker* em sala de aula respondidas individualmente e em questões *clicker* respondidas após discussão em grupo, e compararam as performances em *quizes* administrados após todas as atividades instrucionais nos mesmos conceitos.

Os resultados da pesquisa evidenciaram que, em comparação aos *quizes* de leitura, a performance dos estudantes melhorou quando as questões *clicker* individuais foram feitas após

aulas que focavam nas dificuldades dos estudantes através de um *feedback* eletrônico. Além disso, a performance nas questões *clicker* após discussão em grupo também mostraram melhoras.

Marshmann e Singh (2016) desenvolveram e avaliaram um tutorial interativo quântico em um IMZ com prótons únicos expostos a estudantes de um curso avançado de mecânica quântica. O objetivo dessa criação, segundo as autoras, foi auxiliar no desenvolvimento da habilidade de aplicação de princípios fundamentais em situações físicas em óptica quântica e explorar as diferenças entre ideias clássicas e quânticas. Nesse sentido, o tutorial adaptou ferramentas de visualização para ajudar estudantes a construir intuição física sobre fenômenos ópticos quânticos com prótons únicos incluindo uma configuração de borracha quântica, além de focar em auxiliar estudantes a integrar compreensão qualitativa e quantitativa. Na avaliação dos resultados, as autoras concluíram que a utilização do tutorial no pré-teste e no pós-teste foi encorajadora, uma vez que cumpriu seu papel.

Pedersen et al (2016) acreditam que um ambiente de aprendizagem virtual pode engajar estudantes universitários em um processo de aprendizagem de formas que aulas tradicionais e laboratoriais não podem. Tendo isso em vista, os autores apresentaram um ambiente de aprendizagem virtual, a *Student Researcher*, o qual incorpora simulações, jogos de perguntas e respostas de múltipla escolha, videoaulas e gamificação em um caminho de aprendizado para mecânica quântica para alunos em nível avançado na universidade. O primeiro teste feito com esse ambiente de aprendizagem virtual foi em 2014, em um curso avançado de mecânica quântica, na Universidade de Aarhus, com quarenta e sete estudantes. Os autores descobriram que a aprendizagem aumentou em estudantes que eram mais ativos na plataforma independentemente das performances anteriores.

Partindo do resultado de pesquisas que mostram que alunos de introdução à física normalmente têm dificuldade em usar um conceito em contextos diferentes dos quais eles aprenderam sem ajuda de um professor, Maries et al. (2017) investigaram o aprendizado de conceitos em mecânica quântica de alunos avançados e desenvolveram tutoriais interativos que ajudaram a aprender os conceitos em questão. Foram dois tutoriais, IMZ e experimento de fenda dupla, que ajudaram os estudantes a saber usar o conceito de informação “*which-path*” para raciocinar sobre a presença ou ausência de interferência de dois experimentos em situações diferentes. Através desse experimento, os autores investigaram se a exposição adicional ao conceito de informação “*which-path*” promoveu aprendizagem. Os autores encontraram evidência de que ambos tutoriais promoveram o raciocínio das informações e ajudaram os

estudantes a usar esse raciocínio adequadamente em conceitos diferentes daqueles em que haviam aprendido.

Outro artigo de De Ambrosis et al. (2017) apresenta resultados de uma pesquisa em uma sequência de ensino-aprendizagem em introdução à física quântica baseada na soma de caminhos de Feynman numa escola de ensino médio italiana. Esse estudo consistiu em focar na compreensão dos estudantes de duas ideias fundamentais na física quântica, a dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza. As autoras consideraram que pesquisas recentes reportaram uma fragmentação nos modelos mentais de conceitos quânticos dos alunos em instrução inicial, e coletaram e analisaram dados usando ferramentas provenientes da teoria do conhecimento integrado.

Os resultados da pesquisa mostraram que a explicação funcional da dualidade onda-partícula fornecida pela abordagem da soma de caminhos pode ser efetiva por levar estudantes a construir modelos mentais consistentes de objetos quânticos, além de fornecer a eles uma perspectiva unificada de próton e elétron. Os resultados sobre o princípio da incerteza foram menos claros, já que as melhorias pela instrução tradicional pareceram menos significantes.

A pesquisa de De Ambrosis et al. (2017) evidencia que a abordagem da soma de caminhos deve receber mais atenção por parte dos pesquisadores e educadores como possível alternativa para introduzir conceitos básicos de física quântica no ensino médio, e que mais pesquisas devem focar na habilidade dos estudantes conectarem diferentes ideias e experimentos relacionados à teoria quântica como um todo.

Partindo do fato de que o IMZ tem tido um papel importante na física quântica e clássica, e considerando que ele tem sido usado como ferramenta didática no ensino de física quântica, possibilitando direcionar conceitos fundamentais desde o princípio, Cavalcanti et al. (2017), em seu estudo, introduziram uma nova versão de um *software*, desenvolvido por seu próprio grupo de estudos, para aprofundar a discussão da imagem clássica do IMZ. Para isso, os autores apresentaram a sua equivalência com o experimento de dupla fenda e derivaram expressões matemáticas relacionadas ao padrão de interferência, além de explorar o conceito de visibilidade, que os autores consideram essencial na compreensão da complementariedade da onda-partícula em FQ, para tornar os estudantes familiarizados com este experimento e para aprimorar seu conhecimento sobre seus aspectos contraintuitivos.

Uma abordagem puramente matemática do IMZ pode ser muito abstrata, mesmo em cursos de graduação, o que significa que os estudantes podem não entender completamente o significado físico de previsões matemáticas e podem não ser capazes de construir um raciocínio consistente sobre o que está acontecendo. Assim, os autores introduziram a nova versão do

software, chamado IMZ, e os autores assim mostraram como previsões matemáticas estão relacionadas a resultados fenomenológicos. Eles também apresentaram interações discursivas dos alunos demonstrando como o *software* pode ser usado para mediar o aprendizado da visibilidade. Os autores creem que uma compreensão profunda do clássico IMZ é um modo natural de gradualmente introduzir regime de fóton único, compreensão essa que pode ser impulsionada pela simulação computacional, por conceber abordagens didáticas que envolvem conceitos importantes de física quântica.

Ainda no que concerne às dificuldades de estudantes da graduação ou de estudantes graduados em aprender conceitos de MQ, Sayer et al. (2017) consideram que tutoriais interativos pesquisados e avaliados podem ser úteis em tornar esse aprendizado relevante. Isso posto, os autores investigaram dificuldades em mecânica quântica, mais especificamente, sobre o experimento da dupla fenda, em diversas situações em que noções clássicas de onda-partículas eram contraintuitivas e contraditórias. No artigo citado, Sayer et al. (2017) discutem o desenvolvimento e a avaliação de um Tutorial de Aprendizagem Quântico-Interativo que faz uso de simulações para melhorar a compreensão de estudantes sobre o experimento da dupla fenda e os auxilia a desenvolver um bom domínio de assuntos fundamentais em mecânica quântica.

Nesse estudo, os autores discutiram as dificuldades dos estudantes identificadas durante uma avaliação do tutorial e analisaram os dados para validar a sua efetividade. Os dados encontrados sugerem que, em média, o tutorial foi efetivo em ajudar estudantes a desenvolver uma compreensão mais robusta nos conceitos em MQ. Além disso, graduandos de um nível mais avançado do curso superaram estudantes de graduação em física em um pós-teste. Os autores consideram que uma possível razão a essa diferença de performance pode se dar devido ao nível de engajamento ao tutorial, devido ao grau de incentivo.

Em outra pesquisa de Marshman e Singhs (2017), as autoras partiram da asserção de que experimentos de fóton único envolvendo o IMZ podem ilustrar princípios fundamentais da mecânica quântica e fazer conexões entre a teoria abstrata quântica e configurações laboratoriais concretas, o que ajuda estudantes a desenvolverem uma compreensão mais sólida sobre o assunto. Tendo isso em vista, as autoras descreveram as potenciais dificuldades conceituais dos estudantes nesses tópicos envolvendo o contexto do experimento de um único fóton envolvendo IMZ e explicaram como as dificuldades encontradas em pesquisas escritas e em entrevistas individuais foram usadas como guia para o desenvolvimento de um tutorial de Aprendizagem Interativa Quântica.

Em comparação ao pré-teste, o pós-teste sugeriu que a pesquisa baseada no tutorial foi efetivo ao auxiliar estudantes avançados na graduação a aprender sobre aspectos fundamentais em MQ. Além disso, no pós-teste, muitos estudantes foram capazes de levar em conta a natureza de onda de um fóton único, foram capazes de explicar o fenômeno da interferência de um fóton único, e raciocinaram corretamente sobre o estado de colapso do fóton, o que mostra a efetividade do tutorial em auxiliar no aprendizado desses conceitos abstratos.

Netto et al. (2017) apresentam um conjunto de atividades didáticas exploratórias de conceitos de física quântica a partir de uma simulação do IMZ, desenvolvidas com base em pressupostos da teoria da mediação de Vygotsky e da filosofia linguística de Bakhtin. A partir dessas atividades, foi possível simular a interferência em regime clássico, em regime quântico, os fenômenos intermediários de interferência quântica e o emaranhamento quântico. O objetivo geral dessa simulação computacional foi auxiliar os estudantes no processo de compreensão de determinados conceitos da física quântica, através de situações em que padrões de ação eram conflitantes. Os autores creem que essas atividades didáticas podem servir como ponto de partida para abordagens mais fenomenológicas da física quântica em cursos de licenciatura ou bacharelado em física. Além disso, os pesquisadores consideram que essas atividades podem representar uma importante inovação no ensino.

Preocupados com resultados do ensino de MQ no ensino médio, Fernandes et al. (2017) apresentam os resultados de uma pesquisa, uma proposta didática que envolveu discussões sobre MQ e elementos que relacionam física a pinturas de Salvador Dalí. Os autores consideram que as relações entre física e artes aproximam e expressam relações entre educação científica e cultura, de forma a enriquecer o conhecimento e ampliar a visão dos estudantes sobre a construção do conhecimento científico.

Para contemplar todas essas considerações na pesquisa, os autores apresentam uma proposta de metodologia operatória, que aproxima a ciência como conhecimento histórico e social para ensinar MQ, com intuito de tornar o aluno capaz de desenvolver hipóteses, conceitos, situar explicações científicas no tempo. Aliar a física a um componente cultural influencia as interpretações dos fenômenos macro e micro, e contribui para a compreensão da física moderna. Os autores acreditam que adicionar elementos culturais ao mundo da física parece ser necessário para dar certa amplitude ao conhecimento, unir o conceitual ao matemático pode proporcionar níveis mais profundos de compreensão sobre temas de mecânica quântica.

Em sua pesquisa sobre simulações interativas para dar suporte à instrução de MW a estudantes de química, Kohne e Benfield (2017) criaram um projeto baseado em pesquisas que

resultou em simulações interativas - atividades para o ensino e aprendizagem de MQ com ampla variedade de tópicos e níveis. As simulações foram implantadas como uma tarefa de pré-laboratório, como palestras e problemas de lição de casa. Os autores perceberam que as simulações foram eficazes a estudantes de física e química, sendo que a avaliação e o aperfeiçoamento do *feedback* da instrução ainda estão em andamento.

Fanaro e Elgue (2018) analisaram a conceitualização de estudantes a respeito da reformulação quântica do experimento da dupla fenda. A metodologia dessa pesquisa consistiu em categorizar indutivamente depoimentos de oitenta e três estudantes de ensino médio, aos quais foi aplicada uma sequência didática de aspectos fundamentais de MQ. As autoras utilizaram a teoria dos campos conceituais de Vergnaud, identificaram possíveis teoremas que impediram ou facilitaram a conceitualização, utilizaram ainda a técnica de considerar caminhos alternativos, de Feynman, quando houve necessidade, e interpretaram seus resultados deste marco quântico. As autoras concluíram que as situações foram acessíveis aos estudantes do ensino médio em razão de mais da metade dos estudantes terem conseguido reformular quanticamente o experimento da dupla fenda. Além disso, Fanaro e Elgue (2018), através desse experimento, veem a possibilidade de ampliar a sequência didática para tratar de outros conceitos com o mesmo enfoque.

A pesquisa de Emigh et al. (2018), sobre desenvolvimento e avaliação de tutoriais para MQ, descreve o desenvolvimento de uma sequência de três tutoriais que focam na medida quântica e na dependência de tempo, a qual é baseada em pesquisas em livros sobre compreensão dos estudantes e em técnicas e estratégias que se mostraram efetivas em outros contextos em física. Os autores apresentam dados extraídos de um conjunto de quatro testes com questões usado para avaliar a efetividade desses tutoriais em melhorar a habilidade dos estudantes de usar corretamente o raciocínio matemático e conceitual para prever o tempo de evolução de probabilidades quânticas.

Com esse estudo, os autores descobriram que a performance dos estudantes em cada questão foi significativamente melhor do que corresponder a questões dadas após instrução tradicional. A melhora deu suporte à afirmação dos autores de que o conjunto de três tutoriais de Tutoriais em Física: MQ auxilia estudantes de graduação no desenvolvimento de alguns dos conceitos fundamentais quânticos sobre evolução do tempo e medidas quando dados após uma aula instrutiva tradicional.

Estudos mostram que o *feedback* tem um papel muito importante nos resultados de aprendizagem de estudantes. Em razão do *feedback* não ser ainda utilizado efetivamente por professores e estudantes no processo de aprendizagem, Abdurrahman e Umam. (2018)

exploraram o seu impacto como um andaime na avaliação contínua da aula de FQ para alunos futuros professores de física. A metodologia da pesquisa consistiu em criar grupos pré-teste e pós-teste para examinar a efetividade do feedback em avaliação contínua. Os resultados do estudo revelaram que estudantes que receberam feedback baseado no construtivismo metacognitivo e social no estudo de física quântica mostraram melhor média de resultados comparados a estudantes que receberam feedback tradicional baseado no cognitivismo na forma de correção.

A investigação de Lima e Ricardo (2019) teve como foco o ensino de mecânica quântica no ensino médio por meio da abstração científica na interface física e literatura, defendida como uma ferramenta de ensino e aprendizagem em física, sobretudo no que concerne a abstração científica. Os autores desenvolveram conceitos de MQ por meio de Hobsbawn, Era dos Extremos, pela inserção filosófica, histórica, política e social sobre o surgimento da física quântica, e pelos capítulos iniciais de Alice no país do *Quantum* de Gilmore, pelos conceitos físicos de mecânica quântica. Através dos dados colhidos dos alunos após a leitura e análise, os autores descobriram a interface física-literatura como alternativa didática promissora para o ensino da mecânica quântica e também para o ensino da física em geral.

Ferreira e Souza Filho (2019) analisaram o experimento virtual da dupla fenda. Os autores dividiram esse estudo em duas partes: primeira, que tratou da análise clássica do comportamento corpuscular e ondulatório, publicada em outro artigo; segunda, que abordou o comportamento quântico da luz, que apresentam no mencionado artigo. Para essa pesquisa, os pesquisadores analisaram o comportamento de um feixe de luz que atravessou uma parede de duas fendas, caso em que a luz sofreu interferência, e, em seguida, utilizaram o mesmo experimento com fótons individuais, os quais se comportaram como ondas e sofreram interferência, como anteriormente. Por fim, para descobrirem o que estava acontecendo, os autores utilizaram um detector próximo às fendas, momento em que os fótons se comportaram como partículas.

Para explicar os resultados, Ferreira e Souza Filho (2019) utilizaram a notação de *brackets* proposta por Paul Dirac e mostraram matematicamente o que ocorreu no experimento da dupla fenda com objetos quânticos. Para aplicar ao ensino médio, os autores precisaram adaptar o recurso para diminuir a complexidade matemática da noção de Dirac. Com isso, os autores pretenderam descobrir um artifício útil para a compreensão material de conceitos da mecânica quântica a esse nível de ensino.

2.4 COMO OS ESTUDOS ANTERIORES CONTRIBUÍRAM NA ESTRUTURAÇÃO DESTA INVESTIGAÇÃO?

A partir do levantamento e da análise das revisões e das publicações mencionadas anteriormente, buscamos reunir referências em âmbito teórico e metodológico para o desenvolvimento desta investigação. Deste modo, os aspectos positivos e negativos arrolados pelos estudos anteriores foram levados em consideração para que este estudo se diferenciasse e avançasse com o propósito de compreender como os conceitos fundamentais da MQ, principalmente os diretamente relacionados ao experimento da Dupla Fenda e do IMZ, podem ser ensinados e significativamente assimilados pelos estudantes.

O primeiro ponto a destacar é a crescente utilização de *softwares* computacionais, sobretudo na forma de simulações e bancadas virtuais, em propostas didáticas implementadas, que visam o ensino de tópicos fundamentais da MQ. No *hall* destas ferramentas hiperculturais destacam-se com mais potencialidades de exploração conceitual aquelas que representam o arranjo experimental da dupla fenda e o IMZ.

Outro relevante aspecto considerado pelas publicações analisadas é a preocupação e a importância dada à compreensão conceitual dos fenômenos quânticos, além do conhecimento do formalismo matemático predominante nos cursos introdutórios de MQ. Não se considera negligenciar tal formalismo, mas não o tornar exclusivo. Tem-se observado que os estudantes que reproduzem algoritmos de resolução com êxito são aprovados nos componentes curriculares, mesmo não atingindo uma compreensão conceitual acerca dos problemas solucionados. Assim sendo, considera-se que os futuros professores de Física não devam permanecer com lacunas interpretativas a respeito dos temas fundamentais da TQ.

Em relação às concepções e posturas epistemológicas expressas pelos alunos, estudos apontam resultados que se inclinam para a predominância de uma conduta clássica realista no momento de interpretar os resultados observados em arranjos experimentais reais e de pensamento, como por exemplo os experimentos de Stern-Gerlach da dupla fenda e do IMZ, podendo acarretar em imprecisões na compreensão de conceitos e princípios essenciais como aos relacionados à natureza ontológica de partículas clássicas, luz e elétrons. Também são levantados resultados que apontam as dificuldades dos acadêmicos na assimilação de conceitos relacionados com a função de onda, processos de medição, valores esperados e o princípio da superposição.

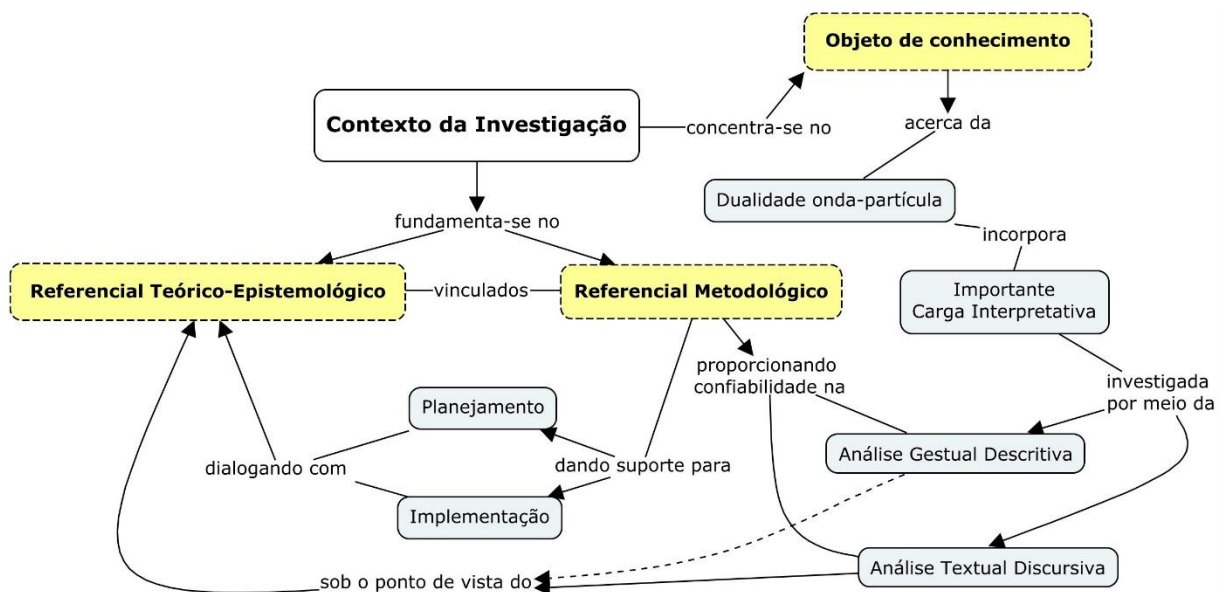
Ao que tange à construção e implementação de propostas didáticas, como já lembrado em Greca e Moreira (2001), percebemos a falta, em diversos estudos, principalmente os

publicados em periódicos internacionais, de um referencial teórico-epistemológico ou de aprendizagem que seja explicitamente citado e utilizado tanto na estruturação das atividades pedagógicas planejadas, quanto na avaliação da sua contribuição para as possíveis evoluções cognitivas dos sujeitos.

Tendo em vista os arcabouços conceituais, teóricos e metodológicos sugeridos pelas publicações consultadas, buscamos efetuar a modelização da nossa investigação⁹ desde a sua fase embrionária no processo de delinear as condições de contorno do estudo até o momento da análise dos resultados e asserções de conhecimento, frente à comparação com os estudos semelhantes realizados em âmbito nacional e internacional.

O diagrama a seguir resume os principais aspectos adotados e explicitados nesta investigação, a partir da análise e discussão da revisão da literatura. Ressaltamos que o conteúdo de conhecimento enfatizado neste estudo e os referenciais teóricos e metodológicos estão descritos e justificados, no âmbito da pesquisa, nos próximos capítulos.

Figura 1 – O esboço da investigação a partir dos aspectos centrais da revisão de literatura.



Fonte: A pesquisa.

Em suma, buscamos explicitar e harmonizar os referenciais teóricos e metodológicos norteadores de todos os caminhos percorridos ao longo do estudo para que as asserções de conhecimento e as possíveis generalizações dos resultados obtidos no processo de responder as perguntas centrais desta investigação sejam passíveis de diagnóstico pelo leitor e possibilitem, assim, comparações futuras com demais estudos da área.

⁹ Os delineamentos metodológicos do estudo, que explicitam todos os caminhos percorridos pelas atividades desenvolvidas com os sujeitos da pesquisa, estão descritos no capítulo 5 deste trabalho.

No próximo capítulo, apresentaremos os dois referenciais teóricos adotados para embasar ações conduzidas por este trabalho.

CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL TEÓRICO

De forma a embasar os desdobramentos que darão sustentabilidade à investigação conduzida nesta tese, apresentaremos neste capítulo os dois referenciais teóricos adotados. Primeiramente, abordaremos a Teoria da Mediação Cognitiva (TMC) (SOUZA, 2004), tendo em vista a sua compreensão e explicação para o movimento de Mediação e Processamento Extracerebral de informações, tratando-os como mecanismos que auxiliam no desenvolvimento cognitivo na medida em que nosso cérebro incorpora de maneira crescente e cumulativa aspectos dos mecanismos externos (ambiente) e passa das formas mais simples para as formas mais complexas de mediação. Ademais, acreditamos que essa escolha seja apropriada, também, pelo seu importante diagnóstico a respeito da influência cultural das tecnologias digitais (TD), principalmente com o uso dos computadores e seus *softwares*, uma vez que elas são as ferramentas hiperculturais (sob a forma de bancadas virtuais) que empregamos ao longo das atividades direcionadas ao ensino de conceitos sobre a dualidade onda-partícula.

Em seguida, serão descritas as ideias de modelização científica de Mario Bunge (1974), sendo este o segundo aporte teórico escolhido para, em diálogo com a TMC, fundamentar as atividades desempenhadas ao longo do processo da pesquisa. A opção pelas ideias racionalistas de Bunge acerca dos Modelos Científicos deve-se pela sua maneira de conceber e alcançar o estabelecimento de relações entre as teorias e os dados empíricos. Na perspectiva assumida por Bunge (1974), a modelização é um método efetivo para a constituição do conhecimento teórico por meio do pensamento. Essa visão filosófica e epistemológica nos orientou na construção da ferramenta sociocultural - os *storyboards*. Estes, por sua vez, apresentam um conjunto de representações que, quando organizadas, configuram a construção dos modelos científicos alusivos às conjecturas de cada uma das quatro principais interpretações da MQ e buscam, assim, expor diferentes pontos de vista para a explicação dos resultados observados no arranjo experimental da dupla fenda.

3.1 A TEORIA DA MEDIAÇÃO COGNITIVA

A TMC (SOUZA, 2004) é uma teoria contextualista, construtivista, que estuda o processamento da informação da inteligência humana e visa proporcionar uma abordagem ampla para a cognição. Devido à expansão atual da era digital, a TMC busca explicar os impactos das tecnologias digitais no pensamento humano e apresentar uma visão da cognição

como um fenômeno de processamento de informações, em que uma boa parte do processamento é feito fora do cérebro.

3.1.1 A Era Digital e o Surgimento da Hiper cultura

Nos dias de hoje, vivenciamos uma era digital na qual o uso de aparelhos eletrônicos, como *smartphones*, *notebooks* e *tablets*, é uma ação corriqueira: pessoas de todas as idades passaram a estar conectadas diariamente. A informação em abundância é obtida e circula instantaneamente pela rede mundial de computadores – a *word wild web* (www). Essa informação está disponível às pessoas por meio do simples acesso à internet ou em um clique de um *mouse* para abrir um aplicativo. Sobre esse fato, Bonilla e Pretto (2015) destacam que os códigos, os *softwares*, as máquinas e a capacidade crescente de processamento e armazenamento contribuíram para o desenvolvimento de uma nova forma de produção de conhecimento, muito mais colaborativo e aberto em rede.

O impacto social e cultural dessa disponibilidade e imersão tecnológica é, agora, notado com a mudança no comportamento da procura e do consumo de informações pela população. Neste contexto, a pesquisa realizada pelo Centro de Estudos sobre as Tecnologias da Informação e Comunicação (CETIC) em 2016¹⁰, apontou, dentre outros dados que exprimem o atual cenário nacional de ascensão tecnológica que 85% dos alunos das séries finais do ensino fundamental e do ensino médio são usuários de internet, sendo que 77% realizam o acesso pelos seus telefones celulares. A pesquisa ainda aponta que 81% das escolas públicas localizadas em zonas urbanas possuem laboratório de informática e destas, 95% possuem acesso à internet. As potencialidades comunicativas/interativas das TD têm evoluído constantemente em todos os segmentos da sociedade e, ao que tudo indica, porções cada vez mais significativas da população acessam a internet de forma progressiva e frequente, bem como manuseiam diversos aparelhos digitais.

Seguindo essa ótica, conforme sinalizado por Souza (2004), pode-se imaginar como a maior quantidade e disponibilidade de conhecimento resultante da Revolução Digital se faz acompanhar de uma necessidade, por parte das pessoas, de criar novos conceitos e habilidades a partir dos quais se possa lidar com essa enorme massa de dados, informações, modelos e teorias. Devido a essa conectividade e ao acesso instantâneo de informação que flui na rede de

¹⁰ Disponível em: http://cetic.br/media/analises/tic_educacao_2016_coletiva_de_imprensa.pdf. Acesso em 05 de julho de 2018.

computadores, o autor acredita na possibilidade de crescimento cognitivo nos indivíduos resultante da manipulação dos *hardwares* e da interpretação dos *softwares*. Isso significa, *grosso modo*, que as formas de pensamento dos alunos atuais passam a ser diferentes das formas de pensar dos alunos que não tiveram forte acesso e interação com as tecnologias.

Segundo Souza (2004), os processos de pensamento são moldados por mediação com o meio e essa mediação vai mudando a própria cultura desses grupos. Portanto, o papel da TD no pensamento humano pode ser considerado uma nova forma de mediação cognitiva com um alcance superior às modalidades anteriores, como a mediação cultural, por exemplo.

Diante desse cenário oriundo da ascendente era digital, o autor visualiza a existência de uma Hipercultura ao argumentar que:

[...] testemunha-se a emergência de uma Hipercultura, onde os mecanismos externos de mediação passam a incluir os dispositivos computacionais e seus impactos culturais, enquanto que os mecanismos internos incluem as competências necessárias para o uso eficaz de tais mecanismos externos. Em termos de impactos observáveis, isso significa que todas as habilidades, competências, conceitos, modos de agir, funcionalidade e mudanças culturais ligadas ao uso de computadores e da *Internet* constituem um conjunto de fatores que difere substancialmente daquilo que tradicionalmente se percebe como cultura (SOUZA, 2004, p.85).

O surgimento da hipercultura é visto pela TMC como consequência de novas formas de interação envolvendo grupos sociais e as tecnologias no nível do indivíduo. Portanto, simuladores virtuais atuam como mediadores digitais possibilitando a criação e/ou modificação de representações mentais e *drivers* na cognição do indivíduo.

Ao ter em vista que os elementos básicos que fundamentam a Hipercultura são a tecnologia da informação, “é de se esperar que o pensamento associado a ela apresente lógicas e formas de representação análogas a tais tecnologias” (SOUZA, 2004, p.85). Sendo assim, de acordo com o autor, espera-se que o Pensamento Hipercultural seja caracterizado principalmente por:

- Uma lógica matemático-científica.
- Representações visuais.
- Formas elaboradas de classificação e ordenamento.
- Estratégias eficazes para identificar o essencial e desprezar o resto.
- Algoritmos eficientes para “varrer” ou “folhear” grandes conjuntos de informações e conhecimentos.

A revolução digital está associada às mudanças socioculturais e psicológicas da geração Hipercultural, que apresenta um novo perfil, conforme verificado por Souza (2004), em uma

pesquisa realizada com o objetivo de identificar a Hiper culturalidade no grupo de participantes do Enem 2000 - médicos, adultos e profissionais recifenses. Nesse sentido, constatou que o surgimento da Hiper cultura está associado às novas formas de pensamento, apresentando ganhos cognitivos que independem de variáveis como sexo, renda e nível de educação (SOUZA, 2006; SOUZA; ROAZZI, 2007; SOUZA; ROAZZI, 2009, RAUPP et al., 2010; SOUZA et al., 2010). A partir desses resultados, Souza (2004) Souza e Roazzi (2009) e Souza et al. (2012) apresentam a TMC. Seus principais fundamentos serão abordados a seguir.

3.1.2 Fundamentos da TMC

A TMC é uma teoria contextualista e construtivista, fundamentada e relacionada com diferentes escolas de pensamento, representadas pelos seguintes autores: Jean Piaget, Gérard Vergnaud, Lev Semenovich Vygotsky e Robert Sternberg. Um desafio importante para essa teoria é o de “[...] fornecer uma síntese teórica coerente de teorias psicológicas e estruturais que são geralmente vistas como separadas, ou mesmo em conflito umas com as outras, de modo a produzir um modelo unificado” (SOUZA, et al., 2012, p.2). Considera-se, portanto, uma aplicação importante da TMC a sua compreensão das mudanças individuais ou coletivas, associadas à introdução das tecnologias como ferramentas externas ao pensamento dos indivíduos.

A elaboração e execução de uma tarefa mental por parte da espécie humana incorpora mecanismos subjacentes como armazenamento e manipulação de dados. Esse processo, que é levado em consideração pela TMC, ocupa um “espaço” na memória humana. Nesse contexto, Souza (2004) cita diversos autores ao sugerir que o cérebro e os órgãos sensoriais não são poderosos o suficiente para dar conta dos fenômenos cognitivos observados na espécie humana, propondo que “[...] o equipamento cerebral humano não pode ser o suficiente para, por conta própria, fornecer o imenso poder computacional que seria necessário para assegurar a sobrevivência e o bem estar da espécie humana” (SOUZA, 2004, p. 50).

Desta forma,

Sabendo-se que o córtex cerebral é limitado mas que a humanidade superou tais limites, deduz-se que a expansão da capacidade cognitiva dos seres humanos se dá através de alguma forma de processamento extracerebral de informações (SOUZA, 2004, p. 58).

Ainda tratando da capacidade da memória humana, a TMC considera que as atividades mentais realizadas com auxílio de ferramentas externas “liberariam” a memória para a

realização de outras atividades. Um exemplo que afeta atualmente muitas pessoas, relacionado à “liberação de memória” por meio de ferramentas externas, é o de que, há alguns anos, armazenavam-se, em memória, vários números de telefones. Hoje, com a utilização da agenda do telefone celular, que passa a ser um mecanismo externo, armazena-se uma quantidade menor de números telefônicos. Portanto, pode-se considerar a ocorrência de uma melhoria cognitiva obtida por intermédio de agentes externos.

Diante desse cenário, a TMC parte dos princípios de que a cognição humana depende fundamentalmente do processamento de informações, e que o cérebro humano isolado se apresenta como insuficiente para explicar a maior parte do desempenho cognitivo, com os quais se pode concluir que outros mecanismos de processamento de informação estão envolvidos.

Dado que o sistema cognitivo básico envolve apenas sujeito cognoscente, ambiente e objeto cognoscível, conclui-se que é no ambiente que residem tais mecanismos adicionais (já que concluir que eles residem no próprio objeto seria o equivalente lógico a dizer que todo o processamento ocorre no sujeito) (SOUZA, 2004, p. 63).

Sendo assim, a TMC apresenta a Mediação e o Processamento Extracerebral de Informações como mecanismos que auxiliam no processamento cognitivo. A partir dessa ideia principal, o autor constrói um conjunto de conceitos, dentro do seu proposto referencial teórico, dos quais nos chamam a atenção os “mecanismos externos de mediação” e os “mecanismos internos de mediação”, buscando trazer uma perspectiva diferenciada no que se refere a considerar a chamada cognição externa (ao cérebro). Desse modo, podemos, aqui, citar o fato do uso de dispositivos eletrônicos – computadores, *tablets* e *smartphones* – se dar por um processo de mediação. Então, é possível inferir que esses dispositivos se tornem mecanismos externos de mediação e que os mecanismos internos são construídos com o passar do tempo e com a necessidade de aquisição de novas competências para o uso desses dispositivos.

Outro argumento a favor da existência de um processamento de informações a nível do ambiente como parte integrante da cognição humana é a constatação de, para que haja a cognição, é preciso que se tenha uma interação sujeito-objeto onde características do segundo são “propagadas” para o primeiro. Com base no raciocínio acima, percebe-se que um modelo científico do pensamento humano precisa levar em conta não apenas uma esfera intracerebral do intelecto, mas também uma dimensão extracerebral onde ocorre a manipulação de dados, informações e conhecimento. A ideia básica é a de que residem no ambiente diversos sistemas físicos, biológicos, sociais e culturais que satisfazem aos requisitos lógicos para o seu uso como dispositivos para a implementação equivalentes de Máquinas Universais de Turing (SOUZA, 2004, p. 63).

Portanto, a TMC é fundamentada e referenciada em cinco premissas relativas à cognição humana e ao processamento de dados:

- 1) A espécie humana tem como maior vantagem evolutiva a capacidade de gerar, armazenar, recuperar, manipular e aplicar o conhecimento de várias maneiras;
- 2) Cognição humana é efetivamente o resultado de algum tipo de processamento de informação;
- 3) Sozinho, o cérebro humano constitui um finito e, em última instância, insatisfatório, recurso de processamento de informação;
- 4) Praticamente qualquer sistema físico organizado é capaz de executar operações lógicas em algum grau;
- 5) Seres humanos complementam o processamento da informação cerebral por interação com os sistemas físicos externos organizados (SOUZA et al., 2012, p. 2, tradução nossa).

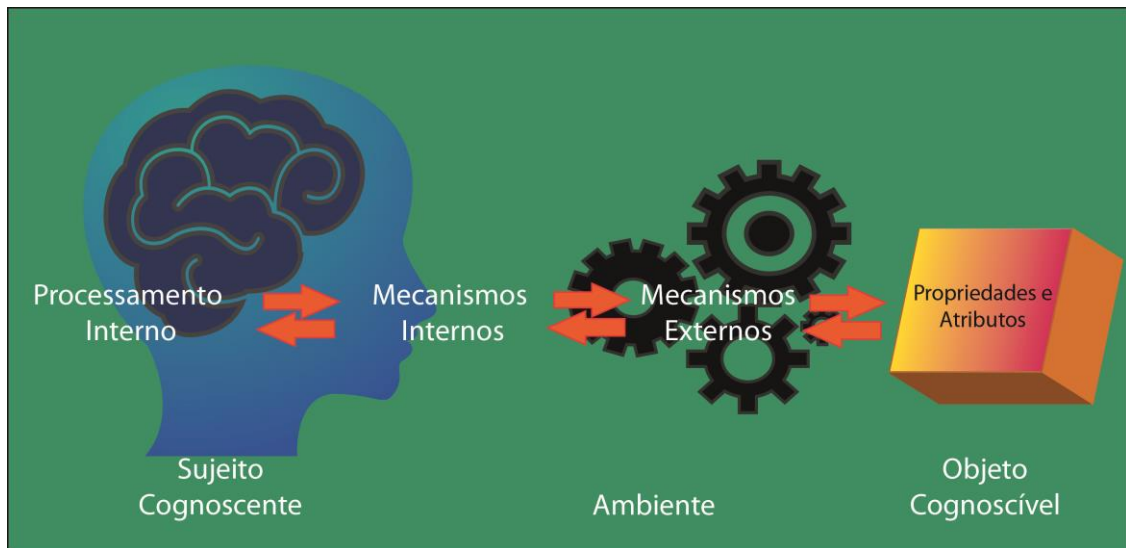
Combinando todos os itens acima, temos uma imagem da cognição humana, arquitetada por meio do resultado de processamento de informações, sendo que uma parte importante desse processamento é realizada fora do cérebro, uma vez que ele é limitado para processar todas as informações disponíveis.

“O processo pelo qual os seres humanos dependem de estruturas externas, a fim de complementar o processamento de informações feito por seus cérebros (cognição extracerebral), é chamado pela TMC de Mediação” (SOUZA et al., 2012, p. 2, tradução nossa). Essa mediação é composta e pode ser escrita por meio dos seguintes componentes:

- ✓ Objeto: o item físico, conceito abstrato, problema, situação, e/ou relação a respeito da qual o indivíduo está tentando construir conhecimento.
- ✓ Processamento Interno: a atividade cerebral fisiológica (sináptica, neural e endócrina) que executa as operações lógicas básicas individuais.
- ✓ Mecanismos Internos: estrutura mental que gerencia algoritmos, códigos e dados que permitem a conexão, interação e integração entre o processamento interno do cérebro e do processamento extracerebral feito pelas estruturas no ambiente, trabalhando tanto como um “*driver de hardware*” como um “*protocolo de rede*”.
- ✓ Mecanismos Externos: podem ser de vários tipos e capacidades, que vão desde simples objetos físicos (dedos, pedras) a individuais e em grupo, com atividades sociais complexas, sistemas simbólicos e ferramentas/artefatos.

A Figura 2 apresenta uma síntese de como ocorre o processamento cognitivo por intermédio de estruturas do ambiente, responsáveis por fornecerem uma capacidade adicional de processamento de informações.

Figura 2 - Processamento cognitivo por mediação externa.



Fonte: Adaptação da imagem presente em Souza (2004).

Nesse sentido, utiliza-se o processamento externo por meio da interação com estruturas do ambiente para aumentar a capacidade de processamento de informações. Por exemplo, quando um computador é utilizado para processar informações, ou mesmo realizar um cálculo mais complexo, está-se recorrendo a um mecanismo externo de mediação. Para tanto, necessita-se construir alguns mecanismos internos que possibilitem manusear esse computador e compreender não somente o seu processamento, mas também as informações que ele está oferecendo.

A estrutura fundamental da Mediação Cognitiva consiste no conjunto individual de mecanismos internos, o qual torna possível a conexão de estruturas externas como auxiliares de dispositivos de processamento de informações. Sendo que, de acordo com Souza (2004, p. 65), “[...] tais elementos [extracerebrais] só poderão efetivamente ser de utilidade para um indivíduo, se este dispuser de uma forma de interagir eficazmente com eles, segundo a necessidade e de modo adequado” com dispositivos existentes na estrutura intracerebral que permitam traduzir as entradas, as saídas e o processamento entre eles. Em resumo, são os *drivers* que possibilitam a mediação com estruturas do ambiente.

Quando se leva em consideração todos os fatores mencionados, surge uma visão da cognição humana como sendo um conjunto sofisticado de mecanismos internos e externos de processamento de informações que, juntos, formam um complexo sistema organizado.

3.1.3 Máquinas virtuais internas: os “drivers”

O termo *driver* é utilizado frequentemente na área da informática. De acordo com Oliveira, Carissimi e Toscani (2001), *drivers* são programas responsáveis pela comunicação entre o sistema operacional de um computador e o *hardware* conectado a ele. É por intermédio dos *drivers* que o sistema operacional recebe as instruções, processa-as e, a partir de então, começa a "conversar" com o periférico.

Em consonância, a TMC, ao tecer uma analogia à computação, própria a uma abordagem baseada na metáfora computador-cérebro da psicologia cognitiva, considera os *drivers* como mecanismos internos presentes na estrutura cognitiva do indivíduo que possibilitam a utilização de mecanismos externos. Portanto, os *drivers* permitem a comunicação entre a estrutura cognitiva do sujeito e o mecanismo externo de processamento de informações de maneira que ambos possam interagir, e o sujeito possa entender o funcionamento desse mecanismo externo a ponto de compreender e internalizar as informações nele contidas (RAMOS, 2015).

Desta forma, o cérebro humano usufrui de competências específicas na intenção da ocorrência de comunicação com os mecanismos internos que, na sequência, contribuirão com o processamento de informações. Assim, torna-se claro o fato de a mediação cognitiva depender diretamente do suporte dos mecanismos internos, *drivers*, para possuir a capacidade de acessar corretamente os mecanismos externos, contudo, o autor afirma:

[...] a mediação cognitiva ocorre se e somente se existirem mecanismos internos de suporte à mediação com capacidade de comunicação e controle em relação a eventuais mecanismos de processamento extracerebral, ou seja, quando o indivíduo detém, dentro de si, um conjunto de conhecimentos e habilidades que lhe permitam o acesso e o uso de tais mecanismos externos (SOUZA, 2004, p.66).

Reforçando a importância desses mecanismos internos no processo de mediação cognitiva, o autor compara os *drivers* às “máquinas virtuais” internas, com um importante papel na definição do pensamento humano, além da “conexão” com o mecanismo externo:

É razoável supor que os mecanismos internos de mediação funcionem através da produção de um shell, ou seja, de uma "máquina virtual" que "espelha" ou "representa" o mecanismo externo. Trata-se de um processo necessário para o estabelecimento de uma interface entre o cérebro e o mecanismo extracerebral, mas também permite, até certo ponto, uma "emulação" ao menos parcial dos mecanismos externos em questão. Isso implica, portanto, numa internalização parcial dos mecanismos externos, o que ajuda a explicar por que as habilidades permanecem aumentadas mesmo quando os mecanismos externos estão ausentes (SOUZA, 2004, p. 81-82).

Acentua-se a importância do processo, pelo fato de que o cérebro, para garantir a mediação cognitiva com um mecanismo externo, como já mencionado, formula novas competências específicas que permitem a comunicação com o mecanismo externo em questão. De acordo com Souza (2004), a aquisição de conhecimentos é resultado de um ganho de processamento de informações, oriundo da mediação que fora estabelecida, sendo que esse processamento de informações adquirido se mantém mesmo que a conexão com o mecanismo externo seja interrompida.

Esse processo é resumido da seguinte forma por Souza et al. (2012):

A fim de integrar o processamento de informação feito pelo cérebro e a um executado por mecanismos externos, é necessário que haja uma ligação lógica entre esses dispositivos computacionais, em outras palavras, alguma forma de traduzir entradas e saídas e débitos entre eles. Isto é muito semelhante ao ter que instalar *software* "driver de dispositivo" em um sistema de computador para que ele possa reconhecer e programar uma parte específica de *hardware* externo, como uma impressora, um *scanner* ou dispositivo de armazenamento. Nos seres humanos, isto pode ser conseguido por meio de uma representação mental de um físico. Nos seres humanos, isso pode ser conseguido por meio de uma representação mental de um sistema físico que é composta por um conjunto de "teoremas-em-ação", no sentido estabelecido pela Teoria Vergnaud dos campos conceituais (Vergnaud, 1997), que são análogos ao funcionamento dinâmico do dito mecanismo externo, por conseguinte, tornando possível que um indivíduo possa interagir com ele para fins de processamento de informação. Portanto, o desenvolvimento desse "mecanismo interno" ocorre por meio da interação entre o indivíduo e o sistema físico correspondente, ou seja, por um processo descrito em Epistemologia Genética de Piaget como "equilibração" (SOUZA, et al., 2012, p. 3, tradução nossa).

Com base nesses aspectos, considera-se que a mediação cognitiva ocorre como função necessária ao impulsionamento da inteligência, relaciona os processos internos e externos à estrutura cognitiva, sendo os *drivers* os intermediários entre o conjunto de conhecimentos que o indivíduo detém dentro de si com as habilidades que lhe permitam o acesso e o uso de mecanismos externos, e visa a aquisição de conhecimentos e, conseqüentemente, o desenvolvimento da sua estrutura cognitiva.

3.1.4 Formas de mediação

Como já abordado, de acordo com as ideias da TMC, o cérebro humano é limitado e incapaz de processar todas as informações dispostas. Portanto, o processamento externo oriundo da interação (mediação) com o ambiente é utilizado diariamente fornecendo à estrutura cognitiva uma capacidade adicional de processamento. Na TMC, Souza (2004) discute as quatro possíveis formas de mediação, as quais serão apresentadas a seguir:

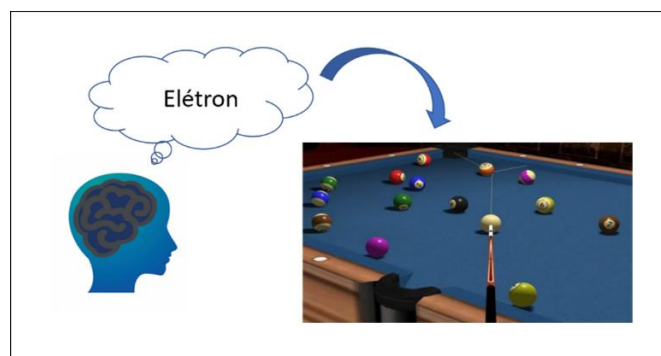
Mediação Psicofísica

A forma mais básica de mediação cognitiva é aquela na qual o indivíduo tem sua interação com os objetos do ambiente condicionada ao seu instinto, ou seja, relacionando as características fisiológicas do sujeito com a composição do objeto, bem como a posição espacial de ambos e da natureza do ambiente. Dentro deste cenário, Souza (2004) considera toda a ação centrada em um personagem ativo que, simultaneamente, transforma e é transformado pelos diversos elementos da sua vida.

Quando os mecanismos externos de mediação resumem-se a eventos físicos, químicos e biológicos fortuitos que agregam alguma forma elementar de processamento extracerebral de informação à relação sujeito-objeto, e os mecanismos internos de mediação constituem-se basicamente de esquemas sensório-motores, pode-se chamar a isso de **mediação psicofísica** (SOUZA, 2004, p. 72).

O processamento extracerebral, via mediação psicofísica, considera as situações em que os componentes materiais do ambiente fornecem uma percepção mais eficiente. Como exemplos de situações nas quais ocorrem mediações psicofísicas, Souza (2004) cita o vento para se captar aromas a distância, a vibração do solo para se detectar a aproximação de uma manada de búfalos, as pegadas para rastrear uma presa. Outra situação que pode ser utilizada como exemplo é a de um indivíduo eleger um local específico de sua casa e lá dispor as chaves do seu veículo, ou da sua própria casa, para que elas sejam encontradas facilmente no momento de sair para o trabalho. Nessa situação, o indivíduo faz uso do processamento externo, psicofísico, para auxiliá-lo em sua memória. A Figura 3 ilustra um exemplo de mediação psicofísica que se enquadra em nosso universo de pesquisa.

Figura 3 – Exemplo de mediação psicofísica.



Fonte: A pesquisa.

Nesse caso, o aluno, ao ser questionado sobre o comportamento do elétron, descreve a sua representação mencionando o jogo de bilhar, ou seja, sua imagem mental inclina-se à

interpretação corpuscular, e ele a descreve utilizando artefatos do ambiente, como os objetos clássicos do bilhar.

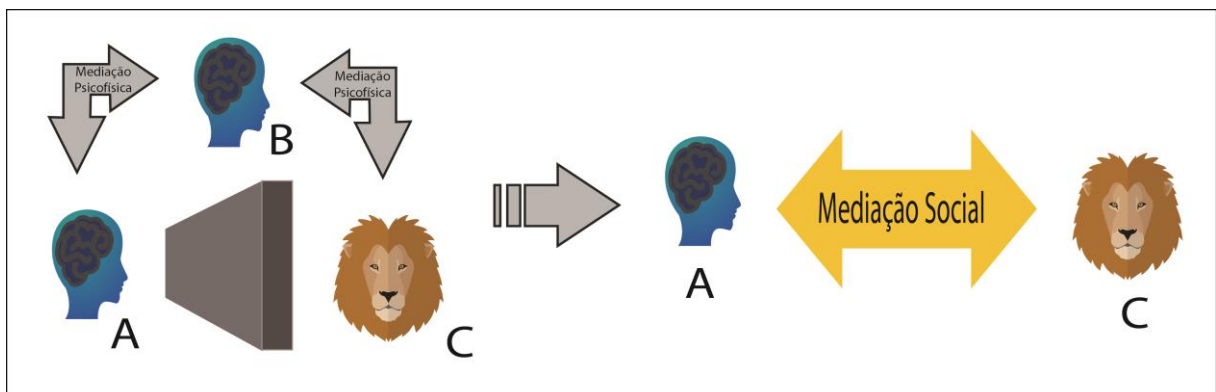
Todos esses casos, sejam eles intencionais ou fortuitos, representam instâncias básicas de mediação cognitiva. Conseqüentemente, *drivers* psicofísicos são criados ou modificados após a ocorrência desse processamento externo.

Mediação Social

Quando se colocam diversos sujeitos em um mesmo ambiente, inevitavelmente algum tipo de interação começa a ocorrer entre eles. Como a espécie humana vive em grupos, padrões são desenvolvidos e tornam-se característicos nesses grupos. Desta forma, a percepção individual do ambiente pelo sujeito não se torna única, mas segue potencializada com a possibilidade de ele utilizar as percepções dos demais integrantes do grupo. Essa condição acaba ocasionando vantagem cognitiva para o sujeito.

Para exemplificar o processamento externo, via mediação social, Souza (2004) aponta a seguinte situação (ver Fig.4): sejam três sujeitos/objetos A, B e C. Suponha-se que A e B são dois homens, e C seja um leão, considerando-se, então, que B possa visualizar C, mas que, por estar à frente de um objeto físico qualquer, A não consiga visualizar C, apenas o B. Nessa situação, B terá um comportamento de fuga agressiva ao perceber o possível perigo de ataque do leão (C). Nesse caso, A reagirá ao comportamento de B como se estivesse na presença de C.

Figura 4 - Exemplo de interação indireta entre dois sujeitos via mediação social.



Fonte: Adaptação da imagem presente em Souza (2004).

A interação em grupo possui o potencial de ampliar o alcance perceptivo de todos os membros. Assim, “[...] o grupo social passa a servir de mecanismo externo de mediação que, sob o ponto de vista de cada indivíduo, realiza uma imensa e importante quantidade de

processamento extracerebral de informações” (SOUZA, 2004, p. 76). Em uma sala de aula, por exemplo, a relação estabelecida entre professor e aluno e a entre os alunos com os próprios alunos é um exemplo de interação social que possibilita o processamento de informação e aquisição de *drivers*. Em vista desses aspectos, pode-se determinar que a convivência social de um grupo influenciará na geração ou modificação de *drivers* sociais, contribuindo para o desenvolvimento cognitivo dos integrantes.

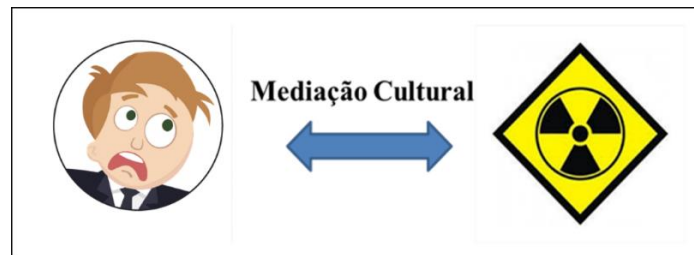
Mediação Cultural

Ao refletir sobre agrupamentos de humanos, pode-se considerar que, quanto maior e mais duradoura for a existência desse grupo, assiste-se à tendência de melhora nas estruturas cognitivas do indivíduo ao tornar mais diversificada e sofisticada a troca de interações entre os membros. Esses fatores levam à criação de formas mais eficazes de comunicação e relacionamento. “[...] Tais mecanismos, por sua vez, tendem a produzir processos mentais mais complexos” (SOUZA, 2004, p. 76).

A criação e o desenvolvimento da linguagem em sua forma de fala e, posteriormente, de escrita e seus respectivos desdobramentos, implicaram a capacidade de a sociedade relatar experiências e acontecimentos, podendo armazenar conteúdos e experiências em objetos inanimados. Desta forma, a linguagem e sua organização textual contêm uma lógica própria envolvendo categorizações complexas de ideias e conceitos, levando a práticas sociais cada vez mais sofisticadas, conforme o seu avanço cultural. Sendo que, conforme Souza (2004, p. 78), “[...] o conjunto de todos esses fatores e dos seus inúmeros desdobramentos compõe aquilo que se convencionou chamar de "cultura"”.

Portanto, pode-se citar o seguinte exemplo de processamento externo de informação, via mediação cultural: quando um sujeito, ao entrar em um ambiente, depara-se com uma placa na qual contém apenas uma imagem (ver Fig. 5), possivelmente esse sujeito saberá que está em um ambiente “perigoso”, devido à exposição de radiação, tomando, dessa forma, as devidas precauções. Esse signo relacionado à radiação foi construído culturalmente, devido ao fato, o sujeito pode processar uma informação externa por meio da mediação cultural, sem a necessidade de utilizar algum objeto de detecção de radiação, por exemplo.

Figura 5 - Processamento externo via mediação cultural.



Fonte: A pesquisa.

“Sob o ponto de vista do processamento de informação a nível individual, através de uma cultura tem-se uma superestrutura extracerebral capaz de realizar operações de percepção, memória, categorização e aprendizagem” (SOUZA, 2004, p.78). Torna-se natural observar que as manifestações específicas desse funcionamento variam conforme as particularidades de cada cultura. Nesse sentido, pode-se confirmar que qualquer ganho em intelecto da parte de um membro é um constante estímulo ao desenvolvimento dos demais.

Aqui, convém mencionar um importante exemplo de mediação cultural, a que é representada e processada pelos livros didáticos e de literatura em geral. Os livros são artefatos construídos culturalmente, um instrumento intelectual que traz consigo expressões e símbolos representativos acerca da sua natureza. Tomamos essas ferramentas culturais como notáveis mecanismos externos na colaboração do processamento de informação, privilegiando a construção de conceitos e a compreensão dos fenômenos. Essa contribuição cultural pode, por exemplo, ser observada nos resultados apresentados em Trevisan (2016), em que um aluno menciona as influências diretas do livro “Alice no país do quantum”, do autor Robert Gilmore (1998), em sua interpretação para o experimento da dupla fenda de Young.

Espelhando as mediações para o ambiente escolar, consideramos o momento de aula como sendo uma mediação composta, denominada sociocultural. As interações com trocas de informações e experiências entre professor e aluno, e também entre aluno e aluno são consideradas sociais, já o espaço formal e a designação de aula são concebidos como uma construção cultural.

Mediação Hiper-cultural

Ao longo das últimas duas décadas, presenciamos o advento de uma nova era, a era tecnológica, caracterizada pela crescente facilidade de acesso à tecnologia e, em especial, ao computador, cenário que recorda o que já foi mencionado em relação à revolução digital e ao

surgimento de uma hipercultura. Essas transformações no acesso ao computador e à *web* levaram a mudanças significativas nas relações de produção, na sociedade e na cultura.

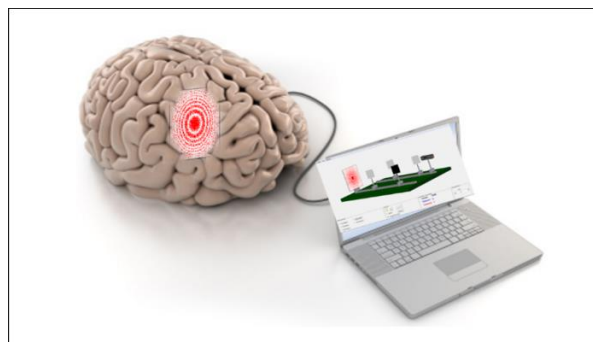
Em decorrência do surgimento da hipercultura, os mecanismos externos de mediação passaram a incluir os dispositivos computacionais e seus impactos culturais, enquanto os mecanismos internos, os *drivers*, adquiriram competências necessárias para o uso eficaz desses mecanismos externos “novos” (hiperculturais). Portanto, Souza (2006) afirma que

[...] todas as recentes habilidades, competências, conceitos, modos de agir, funcionalidade e mudanças socioculturais ligadas ao uso de computadores e da Internet constituem um conjunto de fatores que difere substancialmente daquilo que tradicionalmente se percebe como constituindo “Mundo”, “Sociedade” e “Cultura”, sendo, portanto, uma etapa adicional da evolução cognitiva da humanidade (SOUZA, 2006, p.156).

Nesse espaço, o surgimento da hipercultura é visto pela TMC como consequência de novas formas de interação envolvendo grupos sociais e as tecnologias no nível do indivíduo. Contudo, simuladores virtuais atuam como mediadores hiperculturais com o propósito de criar novas representações mentais e *drivers* no campo cognitivo do indivíduo, com a finalidade de proporcionar avanços significativos dos conceitos abordados.

É adequado lembrar que a proposta do nosso trabalho engloba a investigação dos *drivers* e das representações mentais dos estudantes após o processamento extracerebral via mediação hipercultural, no ensino de conteúdos da MQ. A Figura 6, a seguir, ilustra a utilização de uma ferramenta hipercultural, remete à interação com a bancada virtual empregada em nossas atividades didáticas. De acordo com a TMC, os *drivers* são modificados e/ou construídos ao estabelecer a comunicação entre a estrutura cognitiva e o mecanismo externo (a bancada virtual), sendo que as possíveis habilidades desenvolvidas nesse processo tendem a permanecer aumentadas após a desconexão com o mecanismo externo.

Figura 6 – Exemplo de mediação hipercultural.



Fonte: A pesquisa.

Em síntese, a mediação hipercultural consiste no uso de ferramentas tecnológicas responsáveis por realizarem processamentos externos de informação, interage com os mecanismos internos de processamento e, como consequência, modifica a estrutura cognitiva do indivíduo.

A evolução das formas de Mediação Cognitiva

Por intermédio das quatro formas de mediações propostas pela TMC, recém-apresentadas, verificamos, conforme Souza (2004), uma sucessão das formas de mediação, segundo a sequência com que emergem. Tem-se, assim, uma visão geral da evolução cognitiva da humanidade. Essa evolução é apresentada no Quadro 1:

Quadro 1 - A evolução das formas de mediação cognitiva.

Forma de Mediação	Mecanismos Externos	Mecanismos Internos	Processamento Extracerebral
Psicofísica	Física do Objeto e do Ambiente	Sistemas Sensoriais	Percepção
Social	Interação em grupo	Habilidades sociais	Percepção e Memória
Cultural	Sistemas Simbólicos e Artefatos	Conhecimento Tradicional e/ou Formais	Percepção, Memória, Categorização e Aprendizagem
Hipercultural	Tecnologia da Informação	Conceitos e Habilidades do domínio da TI	Percepção, Memória, Categorização e Aprendizagem, Julgamento, Elaboração, Tomada de Decisões

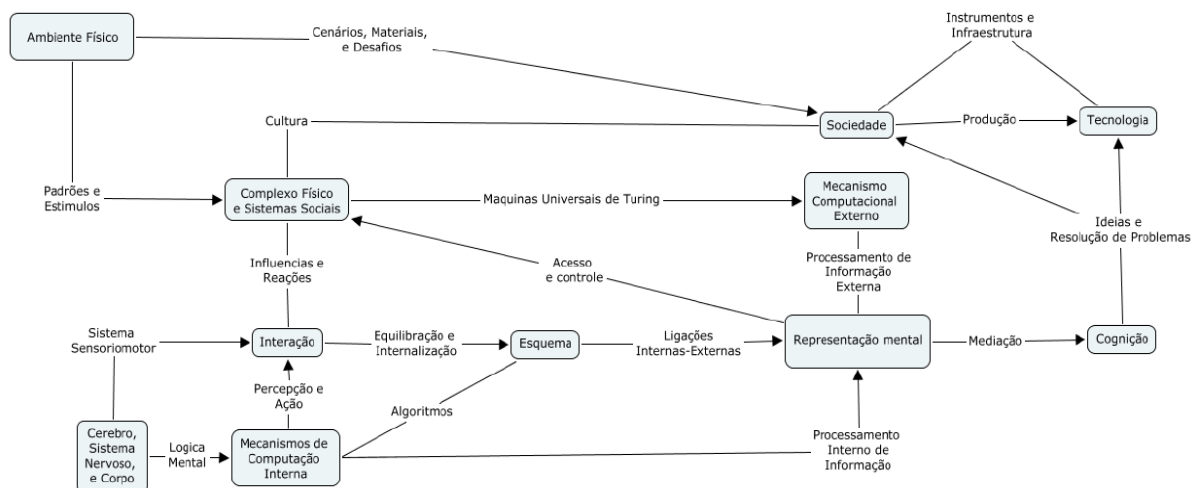
Fonte: Souza, 2004.

Observa-se que, das informações contidas nesse Quadro 1, ganham destaque a crescente complexidade dos mecanismos internos e externos de mediação, da mesma forma dos tipos de processamento extracerebral que eles permitem. Nesse tocante, Souza (2004, p. 79) conclui: “[...] cada novo passo representa uma verdadeira revolução cognitiva, uma enorme expansão quantitativa e qualitativa no alcance da mente humana”.

3.1.5 A TMC sintetizada em um mapa conceitual

Com o objetivo de condensar a TMC ao apresentar seus principais conceitos interligados, Souza et al. (2012) constroem um mapa conceitual (Fig. 7). Optamos por apresentá-lo com o intuito de auxiliar o leitor no seu entendimento a respeito da TMC.

Figura 7 - Mapa conceitual da TMC.



Fonte: Souza et al., 2012, tradução nossa.

Ao analisar esse mapa conceitual, percebemos caminhos tomados para se alcançar a cognição, por exemplo, o conjunto individual de mecanismos internos tornam possível a utilização de estruturas externas como auxiliares de dispositivos de processamento de informações, obtendo ganhos cognitivos. Ainda pode ser vista a ideia da TMC, onde o ser humano expandiu sua capacidade cognitiva resolvendo problemas complexos para um estilo de vida mais confortável, derivando na criação/utilização da tecnologia.

Nesse mapa conceitual não existe um início e nem um fim, ficando a cargo do leitor interpretá-lo. Para tanto, acreditamos que os subsídios teóricos apresentados sejam suficientes.

3.1.6 A TMC como aporte teórico na pesquisa em Ensino de Ciências

Mesmo sendo uma teoria relativamente recente, desenvolvida há menos de duas décadas, a TMC vem sendo usada como aporte teórico em trabalhos de pesquisa direcionados à área de Ensino de Ciências. Portanto, nesta seção, apresentaremos sinteticamente três trabalhos recentes que adotaram a TMC como seu referencial teórico norteador. Dois trabalhos

estão inclinados ao ensino de Física: Wolff (2015), o qual trata de colisões mecânicas, e nosso estudo (TREVISAN, 2016), que realiza uma investigação sobre a dualidade onda-partícula. E um trabalho voltado ao ensino de Química: Ramos (2015), que aborda a modelagem molecular.

Dentro do estudo das colisões, Wolff (2015) buscou analisar duas configurações de colisões mecânicas, uma colisão entre um projétil abandonado a uma determinada altura e o solo, e uma colisão frontal entre dois projéteis, estando ou não inicialmente em movimento, ambas exploradas com auxílio do *software Modellus 4.01* utilizado ao longo das atividades.

Para interpretar os dados obtidos e estabelecer como marco teórico o que se entende como aprendizagem, a investigação utilizou, em primeiro plano, a TMC para obter sistematização e entendimento acerca da mediação digital, e identificar, assim, as possíveis mudanças que ocorreram na estrutura cognitiva dos estudantes que interagiram com as simulações computacionais.

Os resultados apresentados por Wolff (2015) indicaram que as imagens mentais de conceitos associados ao estudo de colisões sofreram importantes evoluções, com modificações dos *drivers* devido às mediações hiperculturais relacionadas com as simulações de colisões. Além disso, esse estudo destacou o aprendizado relacionado ao conceito de colisão elástica com o solo e as respectivas variações/transformações das energias. De acordo com o autor, essa aquisição de imagens potencializa uma aprendizagem significativa dos conceitos de colisões e das Leis de Conservação da Mecânica.

Outra investigação, inclinada ao ensino de física, em que se utilizou a TMC como principal referencial teórico, foi realizada por nós (TREVISAN, 2016). Buscamos verificar a compreensão/interpretação dos estudantes acerca da dualidade onda-partícula com o intuito de construir um esboço do perfil epistemológico de cada aluno participante em relação a esse conteúdo físico.

A investigação centrou-se em buscar as interpretações privadas de cada aluno sobre o comportamento do objeto quântico (fóton e elétron). Para tanto, foram realizadas atividades envolvendo dois *softwares* em forma de bancada virtual que representavam o arranjo experimental da dupla fenda e o IMZ. Após a realização das atividades baseadas em roteiros estruturados, os diálogos individuais entre aluno e pesquisador foram realizados seguindo o método *report aloud*, sendo que as conversas foram pautadas na compreensão dos resultados obtidos nos experimentos virtuais operando em regime clássico e quântico.

A TMC possibilitou a interpretação dos dados e o estabelecimento da relação entre a mediação hipercultural e a modificação de *drivers* e representações mentais na estrutura cognitiva do aluno. Em termos de resultado, o perfil epistemológico dos alunos foi traçado de

acordo com as interpretações privadas, inferidas a partir dos *drivers* conceituais, manifestados e identificados, sendo, também, comparados com as quatro principais interpretações da TQ. Apesar desse resultado positivo, a investigação verificou que os *softwares* não se mostraram eficazes para uma nova aquisição de *drivers* microscópicos. Contudo, o autor finaliza acreditando que a utilização de simulações conceituais, em que objetos quânticos são representados, possibilitará a aquisição de novas representações e *drivers*.

Além destes dois trabalhos relacionados ao ensino de física, apresentamos também uma investigação direcionada ao ensino da Química, realizada por Ramos (2015). A autora buscou compreender como ocorrem as mudanças na estrutura cognitiva dos estudantes após a utilização de um *software* de modelagem molecular, partindo da premissa de que a compreensão de muitos conceitos químicos está diretamente ligada às habilidades visuoespaciais, já que a visualização faz parte de um sistema de percepção de símbolos que são típicos da Química.

Com o objetivo de compreender como ocorre a alteração da estrutura cognitiva dos estudantes após a utilização da modelagem molecular, Ramos (2015) adota a TMC para dar sustentabilidade teórica a sua investigação, devido a sua síntese acerca das teorias psicológicas e estruturais culminando na conjectura de um modelo para a explicação do processamento de informação e aprendizado.

Em seus resultados, Ramos (2015) aponta a identificação na mudança da estrutura cognitiva dos estudantes após as atividades de modelagem molecular. Um dos seus principais resultados indicam que o *software* contribui para que os sujeitos adquiram uma visão dinâmica nos processos de transformação das moléculas, auxiliando na consolidação das habilidades visuoespaciais e uma estruturação generalizada em torno de conceitos da energia.

A seguir, apresentaremos a base teórica da concepção dos Modelos Científicos, sob a perspectiva ideológica de Mario Bunge.

3.2 A MODELIZAÇÃO CIENTÍFICA DE MARIO BUNGE

Físico de formação inicial, o epistemólogo Mario Augusto Bunge, nascido na Argentina, no ano de 1919, tem se destacado mundialmente no campo da Filosofia da Ciência, sendo que sua produção é bastante extensa (MATTHEWS, 2009). Com uma postura racionalista crítica, Bunge dispõe de publicações e contribuições importantes na construção do conhecimento científico.

Em nossa investigação, concentraremos os empenhos teóricos apenas na concepção bungeana de modelo científico (BUNGE, 1974) devido a sua dimensão para o Ensino de

Ciências caracterizada pelo processo de modelização. Essa implicação didática da epistemologia de Bunge já foi mencionada e analisada por trabalhos relevantes para o Ensino, como por exemplo, Pietrocola (1999); Cupani e Pietrocola (2002); Westphal e Pinheiro (2004), Brandão, Araújo e Veit (2011) e Moreira (2014).

Na acepção das ideias de Bunge (1973, 1974), a melhor compreensão do mundo ocorre na medida em que o ser humano se movimenta em direção à construção de conhecimentos teóricos. Nesta razão, a Ciência se apresenta como responsável por subsidiar os conhecimentos teóricos necessários para o entendimento do mundo em toda a sua diversidade. Desta forma, a realidade simplesmente observada e percebida pelos nossos sentidos não pode ser satisfatoriamente compreendida, pois tal assimilação e apropriação do mecanicismo dos fenômenos naturais só podem ser alcançadas com o enriquecimento de conhecimento teórico.

Neste âmbito, Bunge acredita que o principal objetivo da Ciência é fornecer explicações para os fatos reais. Dentro da óptica do realismo não ingênuo, Bunge (1974, p. 10) ressalta que “a ciência contemporânea não é apenas experiência, porém teoria mais experiência planejada, executada e entendida à luz de teorias”. Seguindo o processo científico, ao procurar lançar e confrontar hipóteses e obter resultados passíveis de falseabilidade convergindo então à elaboração de teorias, a ciência se elege a apresentar explicações cada vez mais aprimoradas do mundo.

De acordo com Bunge (1974), a compreensão conceitual da realidade pelo ser humano inicia com idealizações e caracterizações de sujeitos, ou seja, verificam-se atributos comuns de determinados sistemas, que culminam em agrupamentos de diferentes classes de equivalência, promovendo, dessa forma, a construção de um objeto-modelo (ou modelo conceitual) de uma coisa, fato ou fenômeno.

Os Objetos-modelos são descritos por imagens conceituais, representam simbolicamente os elementos presentes em um sistema real que se busca analisar sob a perspectiva de uma teoria mais ampla (ou geral). Seguindo esse contexto, o objeto-modelo é exposto por Bunge (1974, p. 22) como “uma representação de um objeto: ora perceptível, ora imperceptível, sempre esquemático e, ao menos em parte, convencional”. Sendo que o sistema representado pode ser uma coisa, um fato ou um evento/fenômeno podendo ser encarados como equivalentes mesmo que difiram entre si.

Ainda que atingindo um alto grau de realidade, os objetos-modelos não atingem uma operacionalização que vá além da atribuição de propriedades e semelhanças dos sistemas. Para que isso aconteça, eles devem ser incorporados a um corpo de ideias pertencentes a um eixo central no qual possam ser estabelecidas relações dedutivas. Bunge (1974), nesse sentido,

sinaliza que é preciso tecer uma trama de fórmulas em torno de cada objeto-modelo, manter uma coerência junto ao corpo de ideias, possibilitar a constituição de um modelo teórico (ou teoria específica), sendo este o responsável por aproximar/encaixar o objeto-modelo à teoria geral.

Aumentando a capacidade de interpretação da realidade, o modelo teórico passa a representar o comportamento dos objetos-modelos, que, por sua vez, descrevem os objetos reais. O modelo teórico é um sistema hipotético-dedutivo constituído em torno do objeto-modelo, que produz proposições a partir de asserções iniciais sobre o real. Novas situações podem ser interpretadas, além das quais os modelos teóricos foram inicialmente construídos, isto é, novas condições de contorno podem ser testadas, expondo as propriedades e os comportamentos dos objetos-modelos englobados (BUNGE, 1974).

Suscetíveis a verificabilidade, os modelos teóricos, segundo Bunge (1974), são submetidos a provas empíricas, podendo estes ser refutados ou modificados ao buscar a interpretação e o conhecimento de um objeto/situação concreto, sugerindo novas ideias de alterações que devem ser introduzidas para tornar o modelo mais realista. Por conseguinte, as teorias gerais não são testadas empiricamente, permanecem incomprováveis. A teoria geral pode contemplar qualquer aspecto da realidade, desde que siga o processo de teorização, no qual objetos conceituais se agregam às teorias, e, como produto, apresentam representações do mundo. Em outras palavras, fornecem os modelos teóricos que figuram a realidade.

Em campos de estudos recentes, não estão disponíveis estruturas gerais a serem alcançadas, desse modo, de acordo com Bunge (1973), é uma teoria especial, composta pelos seus modelos teóricos, que engloba e trata uma série limitada em vez de um gênero extenso de sistemas físicos. Isto quer dizer que, se pretendemos analisar um caso específico de fenômenos, como por exemplo, os resultados obtidos no experimento da dupla fenda, devemos construir modelos para ele. Ou seja, uma idealização ou esboço do sistema em questão, incorporando alguns dos seus atributos característicos. Logo, “um modelo teórico de um sistema, inclui um modelo dele, i. é, uma representação esquemática do sistema real ou conjecturado. Este modelo é, por vezes, chamado de objeto modelo” (BUNGE, 1973, p. 53). O Quadro 2, a seguir, exemplifica algumas situações modelizadas pela Ciência.

Quadro 2 – Exemplos de modelização.

Sistema	Objeto-modelo	Modelo teórico	Teoria geral
Lua	Sólido esférico girando em torno do seu eixo, em rotação à volta de um ponto fixo, etc.	Teoria lunar.	Mecânica clássica e teoria gravitacional.
Luar	Onda eletromagnética polarizada plana.	Equações de Maxwell para o vácuo.	Eletromagnetismo clássico.
Pedaço de gelo	Cadeia linear casual de contas	Mecânica estatística de cadeias casuais.	Mecânica estatística.
Cristal	Grade mais nuvem de elétrons	Teoria de Bloch.	Mecânica Quântica.

Fonte: Bunge, 1973, p. 53.

Das modelizações apresentadas acima, a descrição da lua como sendo sólida e esférica, com seu movimento de rotação, passa a ser uma representação possível do satélite natural terrestre, cujo comportamento pode ser governado pelas asserções da teoria lunar, sendo essa, uma fragmentação da mecânica clássica e teoria gravitacional. Assim, explicar o efeito da lua sobre as marés, por exemplo, torna-se uma tarefa factível por meio das associações estabelecidas pela mecânica clássica e teoria gravitacional.

Para facilitar a compreensão do conjunto de princípios propostos acerca dos modelos científicos, o Quadro 3, a seguir, apresenta mais um grupo de situações modelizadas e elencadas por Bunge (1974).

Quadro 3 – Continuação de exemplos das modelizações.

Coisa ou fato	Objeto-modelo	Modelo Teórico
Dêuteron	Poço de potencial próton-nêutron	Mecânica quântica do poço de potencial
Soluto em solução diluída	Gás perfeito	Teoria cinética dos gases
Tráfego na hora do rush	Fluxo contínuo	Teoria matemática do fluxo de tráfego
Organismo de aprendizagem	Caixa negra markoviana	Modelo de operador linear de Bush e Mostelar
O canto das cigarras	Coleção de osciladores acoplados	Mecânica estatística de osciladores acoplados

Fonte: Bunge, 1974, p. 35.

Nesse conjunto de exemplos, Bunge (1974) opta por omitir o campo referente à teoria geral. No entanto, a compreensão das modelizações ainda é possível. Dos casos elencados acima, podemos tomar como exemplo a situação cotidiana do tráfego na hora do *rush*, no qual se observa e se define como principal característica o maior fluxo contínuo de carros em trânsito. Diante dessas características, o modelo-teórico incorporado pela teoria matemática do fluxo de tráfego rege o comportamento e soluciona possíveis situações como o desafogo por meio de cálculos e programação de semáforos para obter vantagem nas chamadas ondas verdes (sequência de semáforos com passagem livre).

Neste contexto, observamos que o movimento da modelização se inicia com o desenvolvimento de um objeto-modelo descrito pela esquematização, caracterização e simplificação em certo grau de um sistema ou caso adotado como real. O momento seguinte do processo é a construção do modelo teórico, no qual se busca determinar o comportamento e as disposições dos mecanismos presentes no objeto-modelo.

De um modo geral, os modelos teóricos são constituídos por proposições, das mais simples até as mais elaboradas, tendo como função dar sentido e conduzir todas as estruturas presentes nos objetos-modelos, que, por sua vez, representam os objetos reais. Em outras palavras, a teoria geral é capaz de fornecer a explicação de um objeto-modelo produzindo um modelo teórico da situação/fenômeno estudada.

Assim, os modelos são construídos na necessidade do estabelecimento de relações entre as teorias e os dados empíricos. Pietrocola (1999) ressalta que, na perspectiva de Bunge, no contexto científico, as teorias por si só não são suficientes, pois sendo abstrações realizadas pela razão e intuição dos indivíduos, não se aplicariam *a priori* às coisas reais. Em contrapartida, os dados empíricos estão mais próximos da realidade, mas, sozinhos, não têm a capacidade de gerar conhecimento. “Desta aparente dicotomia entre teórico e empírico, é introduzida a modelização como instância mediadora” (PIETROCOLA, 1999, p. 222).

Por todas essas dimensões, Bunge assume que o método efetivo para apreender a realidade pelo pensamento é a modelização. Ou seja, é o processo de “converter coisas concretas em imagens conceituais (objetos-modelos) cada vez mais ricas e expandi-las em modelos teóricos progressivamente complexos e cada vez mais fiéis aos fatos” (BUNGE, 1974, p.30). Sendo assim, Pietrocola (1999) sinaliza que, para Bunge, os modelos são concebidos como a essência do próprio trabalho científico.

3.2.1 Transposição didática dos modelos científicos

Transitando os conceitos de modelização apresentados para as reflexões no Ensino, Pietrocola (1999) acredita que os modelos são a essência do ensino de ciências, visto que o estudante, ao construir modelos, desenvolve sua capacidade criativa com objetivos que superam em potencialidades os desafios do universo escolar tradicional. “A busca de construir não apenas modelos, mas modelos que incrementem nossas formas de construir a realidade, acrescenta uma mudança de ‘qualidade’ ao conhecimento científico escolar” (PIETROCOLA, 1999, p. 224).

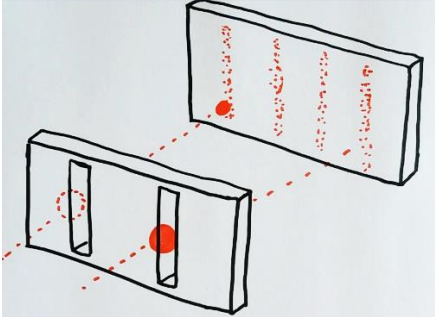
A possibilidade de incorporar o método da modelização no ensino de Física oportuniza a condução de atividades em que os alunos possam interpretar a realidade e representá-la a partir de teorias gerais. Cupani e Pietrocola (2002) aduzem que, durante décadas, críticas são realizadas pelos estudantes aos professores, alegando que não veem utilidade naquilo que lhes é ensinado. Por essa razão, os autores apontam que parte dessas críticas poderia ser minimizada caso os conteúdos da ciência fossem apresentados como forma de produzir e validar modelos para explicar porções do mundo. “As teorias vistas com esta possibilidade modelizadora permitem apontar caminhos para a construção de representações não arbitrárias do mundo, de onde explicações podem ser produzidas” (CUPANI; PIETROCOLA, 2002, p. 121).

Seguindo os pressupostos conceituais acerca dos modelos científicos, buscamos em nosso trabalho desenvolver uma proposta em que os estudantes, após realizarem atividades guiadas com *softwares*, assistissem a um seminário em que as quatro principais interpretações da MQ fossem estudadas de acordo com as suas explicações para os resultados do experimento da dupla fenda. Para tanto, utilizamos como principal material de apoio os trabalhos de Pessoa Jr (1997, 2006 e 2008).

As interpretações foram estudadas com a pretensão de estabelecer os objetos-modelos e conseqüentemente alcançar os modelos teóricos possíveis para o entendimento dos resultados obtidos nas diferentes configurações do experimento. Essa abordagem visou elucidar os alunos para que, quando questionados acerca das suas interpretações para os resultados do IMZ, pudessem desenvolver mecanismos que facilitem seu entendimento, ou seja, a construção de modelos teóricos que possam contribuir para o estabelecimento do estudante em uma das interpretações da MQ.

Um exemplo possível da modelização realizada na construção do material implementado pode ser observado no Quadro 4:

Quadro 4 - Exemplo de modelização de uma situação ou fato.

Sistema	Objeto-modelo	Modelo teórico	Teoria geral
<p><i>Setup</i> experimental da Dupla Fenda (regime quântico)</p>	<p>Ilustração:</p>  <p>Caracterização: corpúsculo esférico com trajetórias definidas. (Possível representação/comportamento do objeto quântico (elétron)).</p>	<p>Interpretação Corpuscular (realista)</p>	<p>Mecânica Quântica</p>

Fonte: A pesquisa.

Nesse quadro, é apresentado um exemplo da modelização de um sistema constituído pela configuração do aparato experimental da dupla fenda. Nessa situação, leva-se em conta uma postura corpuscular que pode partir do espírito científico do sujeito. As representações que descrevem o elétron ao longo do *setup* experimental idealizam um elemento que não pode ser observado diretamente, sob tal arquétipo se constitui o modelo teórico, produz proposições e explicações acerca do comportamento do objeto-modelo. Em síntese, a teoria é capaz de fornecer a explicação de um objeto-modelo que produz um modelo teórico da situação enfocada.

Estamos cientes de que essas representações podem, em situações futuras, tornar-se obstáculos epistemológicos (BACHELARD, 1996). No entanto, acreditamos que as vantagens conceituais adquiridas no processo se sobressaem. Ademais, “a possibilidade de comparação e a tomada de decisões sobre qual forma representar a realidade tornará os alunos mais críticos e mais capazes de desfrutar dos insights que tem apaixonados cientistas ao longo dos tempos” (PIETROCOLA, 1999, p. 226).

3.3 A TMC ASSOCIADA À MODELIZAÇÃO CIENTÍFICA: uma vantajosa sustentação teórica

Tendo em vista as concepções e os constructos pertencentes aos princípios centrais da TMC e dos Modelos Científicos bungeanos, podemos salientar o estabelecimento de uma complementação e harmonização teórica na fundamentação dos passos adotados em nossa investigação de tese. Retomando a atenção para os quadros 3 e 4, por exemplo, que resumem as ideias essenciais das duas teorias, podemos relacioná-las exatamente com as ações desempenhadas ao longo de toda a pesquisa, desde o seu planejamento, execução e asserções de valores e conhecimentos.

A TMC permite-nos elucidar o processo de mediação, a qual se revela por meio do processamento de informação apoiado pela interação com mecanismos externos. Esses mecanismos externos podem ser de origem psicofísica, social, cultural e hipercultural, e realizam um processamento extracerebral que desenvolve e fortalece estruturas internas (*drivers*) específicas na estrutura cognitiva do sujeito. Em vista desses aspectos, as atividades didáticas¹¹ foram engendradas em dois momentos: o primeiro, composto por atividades centradas na utilização de ferramentas hiperculturais sob a forma de bancadas virtuais – O IMZ e a dupla fenda. O segundo momento foi composto por uma aula expositiva dialogada, pautada no uso de *storyboards* com representações microscópicas de cunho interpretativo para auxiliar a compreensão conceitual dos fenômenos observados exclusivamente no arranjo experimental da dupla fenda. Portanto, essa etapa se configura em uma mediação sociocultural¹².

Em relação ao segundo momento da ação didática, podemos destacar a influência dos modelos científicos. Antes, recordamos que a modelização científica no ensino de ciências se concentra no anseio da compreensão racional da realidade, aproxima a teoria dos dados empíricos, isto é, as proposições científicas dos fenômenos e situações reais despontam por meio dos modelos teóricos. Ademais, a asserção dos objetos-modelos, com propriedades específicas orientadas pelos modelos, permitiria os estudantes esquecerem, ainda que temporariamente, a realidade, dedicando seus esforços na compreensão dos mecanismos internos destes. “Nesse sentido, os modelos teriam valor *ontológico*, pois *seriam*, aproximadamente e provisoriamente, a realidade, mesmo que circunscritas local e temporalmente” (PIETROCOLA, 1999, p.224).

¹¹ Foram realizadas ao longo da pesquisa, sendo parte integrante no processo de análise. Essas atividades estarão descritas detalhadamente no capítulo que apresentará os delineamentos metodológicos da tese.

¹² Lembramos que este gênero de mediação foi organizado e mencionado na Seção 3.1.4.

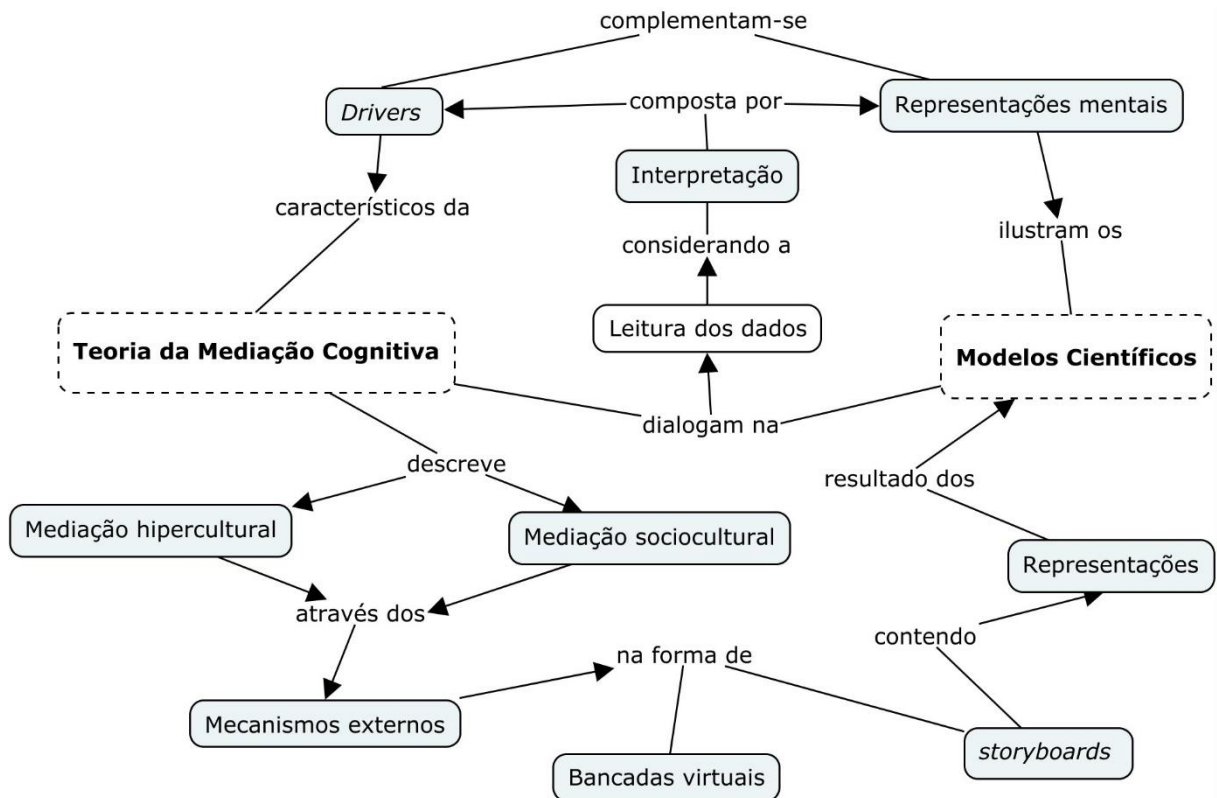
A construção dos *storyboards* só foi possível a partir do processo de modelização. Para tanto, baseamo-nos na literatura, em especial, nas obras de Pessoa Jr (1997, 2006 e 2008), e nos resultados empíricos dos regimes clássico e quântico do arranjo experimental da dupla fenda. Esse suporte teórico nos permitiu caracterizar e ilustrar quatro diferentes estruturas (vinculadas às quatro principais interpretações da MQ) de objetos-modelos, que, nesse caso, representam o objeto quântico ao longo do *setup* experimental, sendo que esses objetos-modelos são gerenciados pelos seus modelos teóricos (as interpretações em si), ambos pertencentes a uma teoria mais geral, a MQ.

A aula expositiva dialogada foi centrada no resultado da modelização científica, ou seja, na apresentação das representações microscópicas, ilustra as explicações de cada uma das interpretações da MQ para os mesmos resultados empíricos. Sendo assim, os *storyboards* configuram-se como mecanismos externos que auxiliam no processamento extracerebral do indivíduo, o que possibilita a construção e/ou modificação de *drivers* na estrutura cognitiva.

Seguindo este horizonte, o movimento de análise, em nosso processo investigativo, dirige-se à identificação dos *drivers* e das representações mentais dos licenciandos em física acerca dos conceitos da dualidade onda-partícula. Nesse contexto, conectamos a TMC e os Modelos Científicos, vinculamos a argumentação e possível modelização espontânea apresentada pelo estudante ao longo dos questionamentos com os mecanismos externos utilizados em situações mediadoras anteriores. Isso tudo, com o objetivo de inferir as formas de mediação que mais contribuiriam conceitualmente para a construção da sua atual interpretação a respeito da dualidade onda-partícula. Sobretudo, buscamos analisar as possíveis alterações conceituais ocorridas após a realização das atividades mediadas pelas bancadas virtuais e *storyboards* com representações específicas.

A Fig. 8 exibe uma visão geral para a combinação da TMC com os Modelos Científicos na sustentação teórica da tese.

Figura 8 – Mapa conceitual do referencial teórico no universo da pesquisa.



Fonte: A pesquisa.

Ao longo deste capítulo, buscamos apresentar o referencial teórico que fundamentará os desdobramentos de nossa investigação. Entendemos que o objetivo principal do entrelaçamento da TMC com os Modelos Científicos de Bunge é o de alcançar subsídios conceituais que esclareçam tanto a mediação e o processamento de informação pelo cérebro, quanto a forma racional crítica para asserções de conhecimento acerca de sistemas reais.

Desta forma, podemos estabelecer um importante vínculo de concordância nos âmbitos metodológico e epistemológico com a promoção de mecanismos externos que atuem como mediadores, contribuindo para o desenvolvimento de estruturas internas e evolução cognitiva. Acreditamos que as bancadas virtuais e os *storyboards*, com representações obtidas pelo processo de modelização bungeana, atuarão como processadores extracerebrais e impulsionarão a capacidade de resolução de problemas e construção espontânea de modelos teóricos acerca do fenômeno da dualidade onda-partícula.

CAPÍTULO 4 – AS BANCADAS VIRTUAIS E OS *STORYBOARDS*: o estudo conceitual da dualidade onda-partícula

Neste capítulo, será abordado o tema da dualidade onda-partícula sob o plano de fundo das bancadas virtuais e dos *storyboards*, bem como as quatro principais correntes interpretativas da MQ, auxiliares na compreensão conceitual desse fenômeno. Inicialmente, apresentaremos uma conceitualização geral acerca do tema e, em seguida, serão descritos os arranjos experimentais virtuais da dupla fenda e do IMZ e os *storyboards* com representações específicas, ambos utilizados como mecanismos externos de mediação nas atividades didáticas propostas por esta investigação (TREVISAN; SERRANO, 2019).

4.1 O CENÁRIO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Viu-se historicamente a instauração de debates relacionados ao comportamento da luz, sendo que a indisposição maior entre os físicos culminou com as explicações do espectro de radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e o efeito Compton, nas quais desconsideravam a concepção ondulatória da luz, até então consolidada e corroborada pelo eletromagnetismo de Maxwell. Diante desse cenário, verificou-se a necessidade da utilização de duas concepções antagônicas e, até então, inconciliáveis para luz, a ondulatória e a corpuscular, para a explicação da totalidade dos fenômenos.

Na FQ, os dois modelos são necessários para descrever completamente qualquer ente físico, seja uma radiação eletromagnética ou objetos quânticos, como fótons e elétrons, por exemplo, embora não nas mesmas circunstâncias. É a isso que se refere a expressão dualidade onda-partícula. De acordo com Pessoa Jr (2006), a TQ precisa conciliar comportamento de onda e partícula sem sustentar a contradição de que as partículas clássicas são pensadas como pequenas esferas com velocidade bem definida e posição precisa no espaço, sendo que as ondas clássicas não são bem localizadas ou descrevem trajetórias bem definidas, elas são espalhadas no espaço e podem exibir alguns comportamentos tipicamente ondulatórios, como o fenômeno de interferência.

Pessoa Jr (2006) sugere o acompanhamento da formação do padrão de interferência no experimento da dupla fenda, no qual a fonte de luz é bastante tênue (regime monofotônico). Visualizam-se pontos aparecendo um após o outro, correspondendo a cada fóton sendo detectado, porém, tais pontos se agrupariam em bandas, acompanhando o padrão de intensidade típico da interferência. Nesse tocante, Pessoa Jr (2006) apresenta uma primeira versão para a

dualidade onda-partícula ao enunciar: “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” (PESSOA JR, 2006, p.3).

É importante notar que esse enunciado não afirma que os fótons ou os elétrons são sempre indivisíveis ou pontuais, 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 sempre podem exibir interferência, ou seja, é sempre possível montar um arranjo experimental no qual o objeto quântico apresente um padrão de interferência.

Assim, viu-se um fenômeno tipicamente quântico, obtido a partir de um evento descrito pela física clássica ondulatória - a interferência da luz – que reduz a intensidade do feixe de luz, até o momento em que pacotes individuais de energia possam ser detectados. Neste tocante, Pessoa Jr (2006) afirma que muitos dos mistérios da FQ, como o princípio da incerteza e o efeito túnel, são fenômenos que passam a ser quânticos quando se reduz a intensidade do feixe, mas que, em nível macroscópico, são descritos pela óptica ondulatória.

Para entender o comportamento da luz no regime quântico é preciso recorrer à lei de energia do fóton, postulada por Einstein em 1905, que, baseando-se no trabalho de Planck, definiu a energia de cada fóton detectado, sendo essa dada pela equação $E = h\nu$, em que ν é a frequência da luz, e h é a constante de Planck. Por volta de 1909, Einstein, e também Stark, obtiveram o momento para o fóton, que, em 1923, foi generalizado por De Broglie para todas as partículas. O momento é dado pela equação $p = h\lambda$, sendo λ o comprimento de onda. Na física clássica, a intensidade I da onda (energia por unidade de tempo e de área) é proporcional ao quadrado da amplitude ψ . Já, no regime quântico, a intensidade corresponde ao número de quantas detectados. Assim, segundo Pessoa Jr (2006, p.7), numa determinada região do espaço, “o número de quanta detectados será proporcional ao quadrado da amplitude da onda associada àquela região”. Se for preparado experimentalmente apenas um único quantum, fóton, no caso do campo eletromagnético, ou elétron, no caso de um campo de elétrons, de acordo com a regra proposta por Born, em 1926, a probabilidade de detectá-lo, em certa região, será proporcional ao quadrado da amplitude ψ da onda associada àquela região:

$$Prob. \propto |\psi|^2 dV \quad (1)$$

Essa breve introdução sobre a dualidade onda-partícula se faz necessária para “abrir as portas” às discussões acerca dos *storyboards* e dos dois experimentos utilizados por este trabalho sob a forma de bancadas virtuais, sendo que os fenômenos observados através das simulações geradas envolvem a natureza dual de entidades quânticas e da radiação

eletromagnética, na qual estão enraizados quase todos os problemas filosóficos e epistemológicos relacionados à TQ.

4.2 AS MEDIAÇÕES RESPONSÁVEIS PELAS ATIVIDADES DIDÁTICAS

Para iniciar a construção das atividades didáticas propostas por esta investigação, levamos em consideração resultados observados nas publicações da área nas últimas duas décadas. Um dos principais pontos levantados pela literatura, que nos estimulou a desenvolver esta investigação, foram as dificuldades da compreensão conceitual apresentadas pelos estudantes em cursos introdutórios de MQ. Como mencionado anteriormente, os estudantes alcançam a aprovação nos componentes curriculares mesmo que não tenham assimilado uma carga conceitual apropriada para a compreensão dos fenômenos quânticos fundamentais.

Em relação às concepções e posturas epistemológicas expressas pelos alunos, estudos apontam resultados que inclinam-se para a predominância de uma conduta clássica realista no momento de interpretar os resultados observados em arranjos experimentais reais e de pensamento, como por exemplo, os experimentos de Stern-Gerlach da dupla fenda e do IMZ, o que acarreta em imprecisões na compreensão de conceitos e princípios essenciais, como aos relacionados à natureza ontológica de partículas clássicas, luz e a elétrons. Levantamos resultados que apontam as dificuldades dos acadêmicos na assimilação de conceitos relacionados com a função de onda, processos de medição, valores esperados e o princípio da superposição. (MANILLA; KOPONEN; NISKANEN, 2002; MONTENEGRO; PESSOA JR, 2002; PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009; WUTTIPROM et al., 2009; AKARSU, 2010; BAILY; FINKELSTEIN, 2010; AYENE; KRIEK; DAMTIE, 2011; ZHU; SINGH, 2012; MARSHMAN; SINGH, 2015, BAILY; FINKELSTEIN, 2015; MALGIERI; ONORATO; DE AMBROSIS, 2017; MARIES; SAYER; SINGH, 2017, TREVISAN; SERRANO, 2018.)

Os estudos anteriores também levantam as potencialidades dos *softwares* computacionais no ensino de conteúdos introdutórios da MQ, ou seja, as contribuições dessas tecnologias digitais para a compreensão dos fenômenos quânticos (PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009; KOHNLE et al, 2015; MARSHMAN; SINGH, 2016; MARIES; SAYER; SINGH, 2017; TREVISAN; SERRANO, 2018). No entanto, como já mencionado na introdução desta tese, esses *softwares*, sobretudo os que simulam o arranjo experimental da dupla fenda e o IMZ, não costumam acrescentar representações de cunho interpretativo, deixando lacunas interpretativas a respeito dos resultados apresentados após a simulação, a

cargo de serem mentalmente preenchidas pelos estudantes, de acordo com as suas concepções construídas.

Neste tocante, buscamos desenvolver um objeto de aprendizagem em formato de *storyboard* para fornecer representações alusivas as quatro principais interpretações da MQ e explicar os resultados apresentados nas configurações do arranjo experimental da dupla fenda. O material foi elaborado por meio de uma adaptação dos conceitos apresentados na linha de trabalhos de Pessoa Jr (2006). Dessa forma, buscamos fornecer ilustrações que idealizassem o comportamento do objeto quântico em virtude das diferentes interpretações reconhecidas. Nosso trabalho fundamenta-se nas ideias de Bunge (1974) para os modelos científicos, sendo assim, retratamos os objetos-modelos, relacionando-os com o modelo teórico que prevê o seu comportamento, isso tudo dentro de uma teoria mais ampla.

A seguir, serão apresentados os mecanismos externos de processamento de informações, descritos pelas simulações computacionais e *storyboards* com representações microscópicas representativas.

4.2.1 As Bancadas Virtuais

As ferramentas hiperculturais escolhidas como mecanismos externos de mediação nas instruções didáticas são dois *softwares* computacionais interativos que simulam os arranjos experimentais da Dupla Fenda e o IMZ. Ambas simulações foram testadas em estudos anteriores e apresentaram suas potencialidades em termos de ensino e aprendizagem em cursos introdutórios de MQ, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

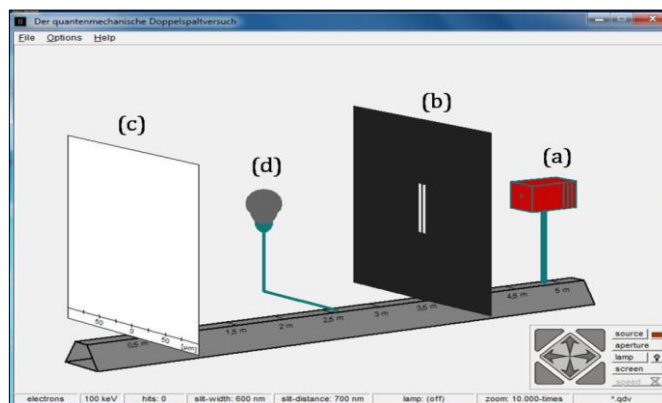
O EXPERIMENTO VIRTUAL DA DUPLA FENDA

Nas seções seguintes, exploraremos o experimento da Dupla Fenda de uma forma bastante didática, considerando a explicação fornecida por Feynman, Leighton e Sands (2008) como uma das mais acessíveis e didáticas possíveis, acreditamos que essa informação seja importante pelo fato de o espectro de leitores dessa tese seja essencialmente composto por licenciandos em física e professores já atuantes em turmas de ensino médio, não apenas pesquisadores da área. Contudo, um olhar crítico sobre a explanação utilizada por Feynman, Leighton e Sands (2008), pode indicar que a abordagem é tendenciosa para uma determinada interpretação – como seria qualquer exposição deste fenômeno objetivando uma organização didática –. Para qualquer discussão adicional a respeito desse tema, recomendamos as

excepcionais discussões feitas pelo professor e pesquisador Osvaldo Pessoa Jr na sua vida e obra.

Contém todo o mistério da MQ, essa é a descrição de Feynman, Leighton e Sands (2008) para o arranjo experimental da dupla fenda (AEDF). Esse experimento foi desenvolvido por Thomas Young por volta do ano de 1802 e mostrou que a luz se comportava como uma onda, porque os fenômenos da difração e da interferência, observados por Young com seu aparato experimental, eram características exclusivamente ondulatórias. A Fig. 9 apresenta o esquema da dupla fenda utilizado durante as atividades propostas aos licenciandos em física. Isso foi obtido através de um *software* livre¹³, desenvolvido pelo *Physics Education Research Group of the University of Munich*.

Figura 9 – Arranjo experimental virtual da dupla fenda.



Fonte: Imagem extraída do próprio *software*.

O experimento é composto basicamente por: (a) uma fonte emissora, com a capacidade de lançar objetos macroscópicos, como projéteis, objetos quânticos, como elétrons e fótons, e também feixes de luz; (b) um primeiro anteparo contendo duas fendas, na qual o espaçamento entre ambas e suas espessuras são ajustáveis; (c) um segundo anteparo que absorve e detecta a posição em que o objeto emitido pela fonte o colide; e (d) uma lâmpada entre os anteparos, que, quando ligada, possibilita a detecção/observação dos elétrons em seus percursos.

Apresentaremos três regimes importantes para o AEDF: o regime clássico, em duas situações, uma com a fonte emitindo projéteis macroscópicos e outra com a emissão de feixes de luz, o regime quântico, com a fonte emitindo elétrons ou fótons, e o regime quântico, com a presença de um detector/observador.

¹³ Disponível em http://www.didaktik.physik.unimuenchen.de/archiv/inhalt_materialien/doppelspalt/index.html. Acesso em 15 de junho de 2019.

- **A dupla fenda em regime clássico – experiências com projéteis e feixes de luz**

Buscando entender os resultados proporcionados pelas entidades quânticas, primeiramente apresentamos as soluções de dois arranjos experimentais particulares, utilizando projéteis e ondas de luz para que seus comportamentos sejam posteriormente contrastados e comparados com o comportamento dos objetos quânticos.

Considera-se, inicialmente, o comportamento de projéteis no arranjo experimental mostrado na Fig. 9¹⁴. Portanto, tem-se uma metralhadora que atira projéteis em uma varredura ampla de ângulos. Em frente à metralhadora, uma placa com duas fendas da ordem de grandeza dos projéteis. Após a parede, existe o anteparo que vai detectar a posição dos projéteis que o atingirem. Com esse aparato, pode-se calcular a probabilidade de encontrar a posição x em relação ao centro do anteparo da colisão do projétil com o detector, após passar pelas fendas. Fala-se em termos de probabilidade, pois não se pode determinar com exatidão a posição do projétil após a colisão com o anteparo detector.

Para os propósitos atuais, os projéteis serão idealizados tomando-os como indestrutíveis, não se partindo em duas metades, ou seja, chegam inteiros no anteparo de detecção. Dessa forma, o que é medido pelo detector é a probabilidade como função de x , de chegada de um projétil numa certa posição em relação ao centro do anteparo. Antes de apresentar o resultado final para o aparato experimental, analisam-se duas situações: 1^a- A fenda 2 fechada, que impede a passagem de projéteis por ela; 2^o- A fenda 1 fechada.

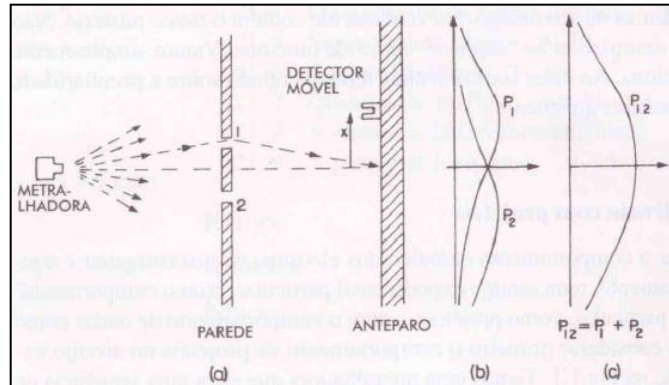
Ao realizar a experiência com a fenda 2 fechada, os projéteis só têm a possibilidade de passar pela fenda 1, resultando na curva mostrada com P_1 na parte (b) da figura. Como é esperado o máximo da distribuição de probabilidade P_1 de detecção dos projéteis, ocorre no valor de x correspondente a uma linha reta entre a metralhadora e a fenda 1. Pode-se dizer que, se um jogador tivesse que fazer uma única aposta para a posição em que o projétil colide com o anteparo detector, a sua maior probabilidade de acerto seria com a escolha pela posição bem em frente à fenda 1. Nesse tocante, quando a fenda 1 é a que está fechada, uma curva simétrica P_2 é obtida na figura, sendo P_2 a distribuição de probabilidades para projéteis que passam pela fenda 2.

Voltando à situação inicial, na qual as duas fendas estão abertas, realiza-se a experiência e verifica-se o resultado apresentado no gráfico da parte (c) da Fig. 10. A probabilidade P_{12} ,

¹⁴ Utilizaremos este modelo de configuração experimental para explicar os fenômenos, o arranjo virtual do *software* utilizado é semelhante e produz os mesmos resultados.

assim chamada porque os projéteis podem ter passado pela fenda 1 ou pela fenda 2, tem seu máximo no valor de $x = 0$.

Figura 10 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com projéteis.



Fonte: Feynman, Leighton e Sands, 2008, p.12.

Comparando as três situações descritas anteriormente, o seguinte resultado é observado:

$$P_{12} = P_1 + P_2 \quad (2)$$

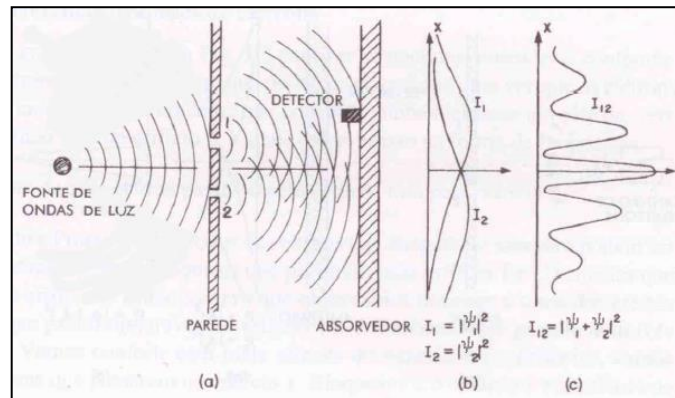
Verifica-se, portanto, que as probabilidades simplesmente se somam, o resultado com as duas fendas abertas é a soma dos resultados de cada fenda aberta separadamente. Feynman, Leighton e Sands (2008) chamam esse resultado de “observação da ‘não-interferência’”.

Agora, será considerada uma experiência da dupla fenda com feixe luz. O aparato experimental é mostrado no diagrama da Fig. 11 e sofre alterações quando comparado ao anterior a fonte emissora, que, em vez de lançar projéteis, passa a emitir ondas coerentes. E o anteparo de detecção passa a medir a intensidade das ondas luminosas, lendo, então, em proporção à energia transportada pela onda.

Ao ligar a fonte, mede-se a intensidade da onda para diversos valores de x (que mantém a fonte de ondas e opera sempre da mesma maneira). O resultado obtido forma uma curva chamada de I_{12} , na parte (c) da figura.

A onda original emitida pela fonte é difratada nas fendas e novas ondas surgem de cada fenda. Se num momento uma das fendas for coberta e, em seguida, medida a distribuição de intensidade, encontra-se a curva de intensidade simples, mostrada na parte (b) do desenho, sendo que I_1 é a intensidade da onda proveniente da fenda 1, medida quando a fenda 2 está fechada, e I_2 é a intensidade da onda proveniente da fenda 2, medida quando a fenda 1 está fechada.

Figura 11 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com feixes de luz.



Fonte: Adaptação da imagem de Feynman, Leighton e Sands, 2008, p.13.

A intensidade I_{12} , visualizada quando as duas fendas estão abertas, não é a soma de I_1 e I_2 . Diz-se, então, que há interferência das duas ondas. De acordo com Feynman, Leighton e Sands (2008), a relação quantitativa entre I_1 , I_2 e I_{12} pode ser expressa da seguinte forma: a amplitude do campo elétrico da onda no detector, para a fenda 1, pode ser escrita como uma parte real de $\psi_1 e^{i\omega t}$, onde a amplitude ψ_1 é, em geral, um número complexo. A intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude ou, usando números complexos, $|\psi_1|^2$. A mesma análise é realizada para a fenda 2, sendo $|\psi_2|^2$ proporcional à intensidade. Quando as duas fendas estão abertas, a amplitude da onda é dada por $(\psi_1 + \psi_2)e^{i\omega t}$ e a intensidade por $|\psi_1 + \psi_2|^2$. Omitindo a constante de proporcionalidade, as relações próprias para as interferências entre as ondas são

$$I_1 = |\psi_1|^2, I_2 = |\psi_2|^2, I_{12} = |\psi_1 + \psi_2|^2. \quad (3)$$

Nota-se um resultado diferente daquele obtido para projéteis (Eq. 2). Pode-se, ainda, expandir o termo $|\psi_1 + \psi_2|^2$, obtendo

$$|\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2|\psi_1||\psi_2| \cos \phi, \quad (4)$$

lembrando que ϕ é a diferença de fase entre ψ_1 e ψ_2 . Em termos das intensidades, pode-se escrever

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi, \quad (5)$$

sendo que o último termo da equação é denominado por Feynman, Leighton e Sands (2008, p.14), “termo de interferência”.

Nesse tocante, de acordo com a teoria ondulatória, a intensidade da luz, numa dada posição do anteparo, é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico E' , e depende da diferença de fase ϕ entre os feixes que se combinam nesse ponto, sendo

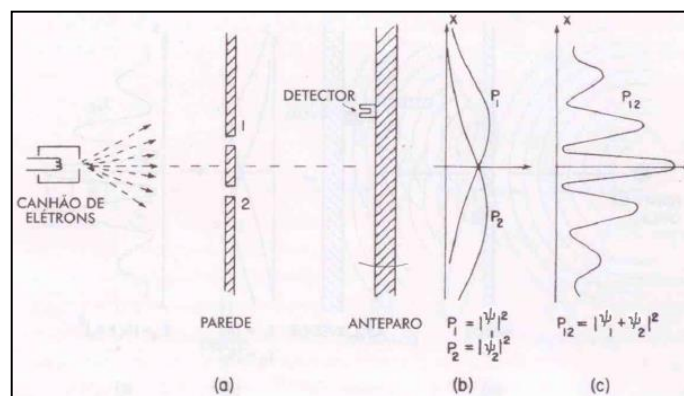
$$I \propto 4E'^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right).^{15} \quad (6)$$

Cada ponto do anteparo final recebe a luz vinda de dois pontos distintos (as duas fendas do anteparo anterior). A diferença do percurso da luz até o ponto de observação faz com que ocorra uma diferença de fase entre as ondas. Nos pontos aonde as duas ondas chegam, em contrafase, ou seja, quando $\phi = \pi$ ocorre interferência destrutiva e, então, não é observada luz nenhuma. Já nos pontos aonde as ondas provenientes das duas fendas chegam em fase, em que $\phi = 2\pi$, ocorre interferência construtiva e um ponto brilhante aparece no anteparo.

- **A dupla fenda em regime quântico – uma experiência com elétrons individuais**

Agora, observamos a experiência da fenda dupla em regime quântico, com a fonte que passa a ser um canhão de elétrons. O anteparo é sensível a ponto de marcar a posição que cada elétron o colide, após ele atravessar as fendas contidas no primeiro anteparo (parede). O canhão de elétrons opera da seguinte maneira: apenas um elétron por vez é lançado, o segundo elétron é emitido somente quando o anterior já foi detectado, apenas elétrons inteiros são detectados no anteparo. Através do arranjo experimental descrito e mostrado na Fig. 12, pode-se encontrar uma resposta para a seguinte pergunta: “qual é a probabilidade relativa de que um elétron chegue ao anteparo em determinada posição x em relação ao seu centro?”.

Figura 12 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com elétrons individuais.



Fonte: Adaptação da figura de Feynman, Leighton e Sands, 2008, p.14.

O resultado da experiência proposta é a curva chamada P_{12} , apresentada na parte (c) da Fig. 12. A curva resultante é a mesma que a originada a partir da experiência da dupla fenda com ondas de luz. Será realizada uma discussão com o intuito de explicar os possíveis motivos desse resultado.

¹⁵ Para explicações mais detalhadas em relação a equação, sugere-se a leitura do livro texto de Eisberg e Resnick, 1979.

Considera-se, inicialmente, uma proposição (A), na qual cada elétron passa pela fenda 1 ou pela fenda 2, antes de ser detectado. Assumindo a proposição A, todos os elétrons detectados podem ser divididos em duas classes: (1) os que atravessaram a fenda 1 e (2) os que atravessaram a fenda 2. A curva resultante observada deve ser a soma de todos os efeitos dos elétrons detectados. Essa ideia pode ser conferida através do experimento, quando a fenda 1 é fechada e, assim, sabe-se que todos os elétrons detectados atravessaram a fenda 2. Em seguida, o mesmo processo ocorre, mas agora com o bloqueio da fenda 2. Assim, observam-se como resultados as curvas presentes na parte (b) da Fig. 11.

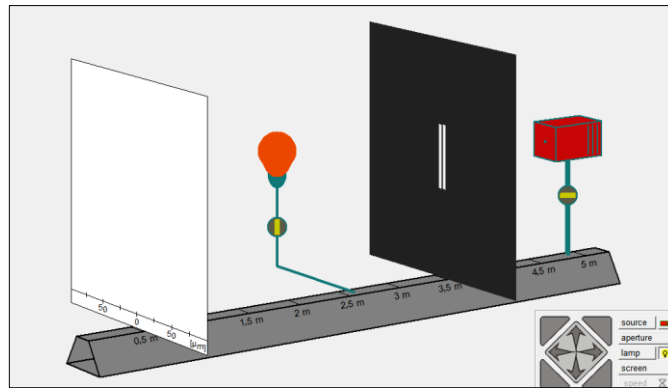
O resultado obtido para a curva P_{12} , quando as duas fendas estão abertas, claramente não é a soma das probabilidades de cada fenda separadamente. Logo, por analogia à experiência realizada com ondas, pode-se dizer que existe interferência. A matemática usada para relacionar as probabilidades P_1 , P_2 e P_{12} é simples em nível de graduação e pode ser considerada a mesma para o caso das ondas de luz, sendo que a curva para P_{12} é como a curva para I_{12} (Fig. 4). A intensidade nas ondas clássicas é definida como a média do quadrado da amplitude da onda, e os números complexos são utilizados para simplificar a análise, mas, na MQ, as amplitudes têm que ser representadas por números complexos, a parte real sozinha não é suficiente.

Dessa forma, pode-se chegar à seguinte conclusão: os elétrons chegam em unidades (inteiros), como as partículas, e a probabilidade de chegada desses elétrons é distribuída como a distribuição de intensidade de uma onda (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2008).

- **A dupla fenda em regime quântico com a presença de um detector**

Neste caso, o arranjo experimental da dupla fenda sofre uma alteração, a fonte permanece em regime quântico, emite elétrons individuais, porém é acrescentado um detector para tentar observar os elétrons que passam pelas fendas. Atrás da parede com as duas fendas, é introduzida uma fonte de luz muito intensa, como mostra a Fig. 13.

Figura 13 – *Setup* experimental virtual da dupla fenda com o detector (lâmpada) ativado.



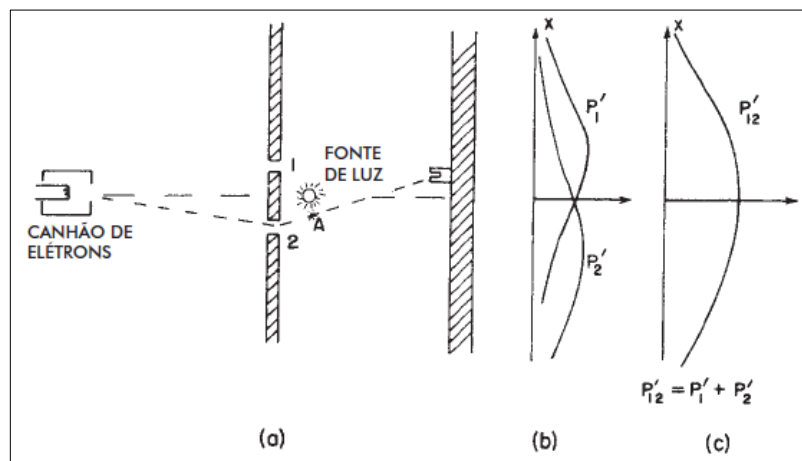
Fonte: Extraído do próprio *software*.

Desta forma, os elétrons espalham a luz. Assim, ao serem detectados, uma espécie de *flash* luminoso é identificado. Logo, se o *flash* estiver sendo visualizado nas proximidades da fenda 1, sabe-se que ele passou pela fenda 1. Idem para a fenda 2. Se a observação dos *flashes* acontecer de forma simultânea, ou seja, partir das duas fendas ao mesmo tempo, pode-se concluir que o elétron se dividiu em dois.

Contudo, ao realizar o experimento, é percebido que quando uma marcação é feita no anteparo, apenas um flash é observado, ou vindo da fenda 1 ou da fenda 2, mas nunca das duas ao mesmo tempo. Pela conclusão de que o elétron passa por apenas uma das fendas, a análise das probabilidades é exatamente oposta à observada no experimento sem o detector, isto é, $P_{12} \neq P_1 + P_2$.

Computando novamente as probabilidades, desta vez com o detector ativado, presta-se atenção para a origem do flash toda vez que o elétron chega no anteparo. Assim, pode ser verificada duas curvas de probabilidades, como mostra a Fig. 14.

Figura 14 - Arranjo experimental da dupla fenda com a fonte emitindo elétrons individuais na presença de um detector (fonte de luz).



Fonte: Feynman, Leighton e Sands, 2008, p.16.

A curva P'_1 representa os elétrons que atravessaram a fenda 1 e a curva P'_2 dos elétrons que passaram pela fenda 2. Podemos notar que essas curvas são semelhantes às curvas P_1 e P_2 , da Fig. 10 (experiência com projéteis), quando são fechados um buraco de cada vez. Por consequência, não importa como essa medição é realizada, se bloqueando uma das fendas ou observando a origem dos flashes de luz, o mesmo resultado para as distribuições de probabilidade é obtido.

À vista disso, a probabilidade total P'_{12} pode ser obtida com a seguinte soma

$$P'_{12} = P'_1 + P'_2 = P_1 + P_2 \quad (7)$$

Desta forma, é como se a origem do *flash* não fosse determinante. A distribuição de probabilidades total está ilustrada na Fig. 14. Assim, pode-se concluir que, ao se observar os elétrons, não há formação do padrão de interferência.

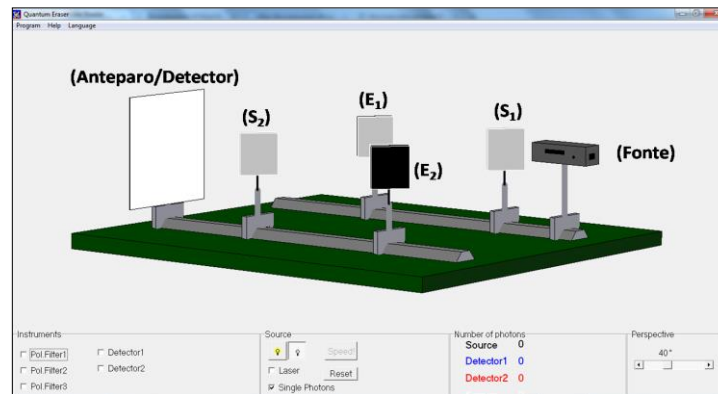
O INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER

Nas próximas seções, abordaremos um arranjo experimental semelhante ao da fenda dupla, que envolve novamente o fenômeno da dualidade onda-partícula. O aparato em questão chama-se IMZ, desenvolvido no século XIX. Informamos que este trabalho utiliza, ao longo das atividades desenvolvidas com os licenciandos em física, uma versão virtual do interferômetro de Muller e Wiesner, obtida em *software* livre¹⁶.

O esquema do IMZ está exposto na Fig. 15, composto por dois espelhos semirrefletores (S_1 e S_2). Esses espelhos são comumente chamados de divisores de feixes, pois transmitem 50% da luz incidente e refletem os outros 50%. Há dois espelhos “comuns” (E_1 e E_2) que refletem 100% da luz incidente, há também um anteparo/detector (D), no qual as imagens dos padrões são formadas após a detecção da luz incidente.

¹⁶ Disponível em <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfere.html>. Acesso em 15 de junho de 2019.

Figura 15 - Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder.



Fonte: Imagem extraída do próprio *software*.

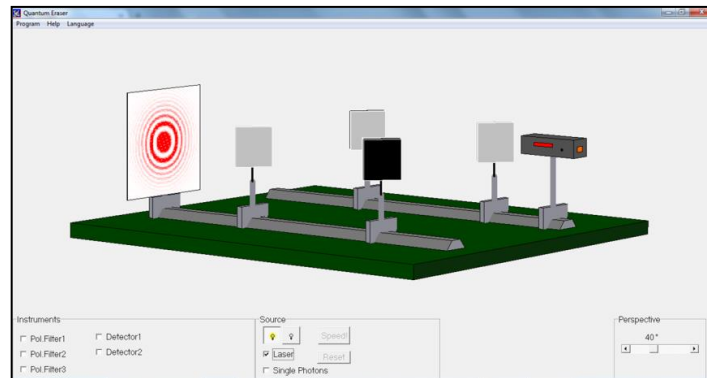
A distância entre os espelhos pode ser modificada de acordo com os objetivos do experimento, mas os espelhos devem estar alinhados para que o ângulo de incidência dos feixes seja sempre de 45° . Esse *software* adota uma leve diferença entre os dois braços do interferômetro, ou os dois caminhos ópticos, de forma que um padrão de anéis circulares aparece no anteparo quando a fonte emite um raio laser.

Serão descritos três regimes importantes do IMZ: o regime clássico, em que a fonte está regulada para emitir um laser, o regime quântico (monofotônico), que diminui a intensidade do feixe emitido a ponto de analisar fótons individuais explicado pela TQ e o regime quântico com a presença de um detector, no qual ocorre uma medição informando o caminho tomado pelo fóton no *setup* experimental. Essas explicações são baseadas em trabalhos de Pessoa Jr (1997, 2006, 2008), Ostermann e Prado (2005), e Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009).

- **O IMZ em regime clássico – interferência com ondas**

No regime clássico, a fonte do IMZ está programada para emissão de luz laser. Esse arranjo faz com que a luz, após percorrer o conjunto de espelhos alinhados, forme um padrão de anéis circulares no anteparo (Fig. 16).

Figura 16 - IMZ em regime clássico na perspectiva de 40°. Há formação do padrão de interferência no anteparo.



Fonte: Extraído do próprio *software*.

Para explicar o padrão observado no resultado da simulação, usamos o mesmo raciocínio empregado ao analisar o experimento da dupla fenda clássico, ou seja, recorremos à teoria eletromagnética, ou teoria ondulatória da luz, a qual estabelece a luz como uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo com velocidade c , cuja intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico associado.

A onda emitida pela fonte incide no espelho S_1 dividindo-se em dois feixes - um transmitido, seguindo o caminho A, e outro refletido, seguindo o caminho B. Esses feixes são posteriormente refletidos nos espelhos comuns, dirigindo-se, então, ao espelho S_2 e, em seguida, chegam ao anteparo. A diferença de comprimento das trajetórias dos feixes (caminho óptico) que atingem o anteparo permite a formação do padrão de interferência observado na Fig. 16. Quando o vale de uma onda encontra o vale de outra, ou a crista de uma onda encontra a crista de outra, ocorre um “reforço”, uma soma entre as ondas, ou seja, uma interferência construtiva – franja clara no anteparo. No entanto, quando um vale encontra uma crista (ou vice-versa), ocorre uma interferência destrutiva – franja escura no anteparo.

- **O IMZ em regime quântico – experiência com fótons individuais**

Para tornar o IMZ um experimento quântico, ainda verificando uma experiência com a luz, torna-se necessário reduzir a intensidade do feixe de luz emitido pela fonte até o ponto em que se podem detectar pacotes individuais de energia (PESSOA JR, 2006). Pode-se dizer que os resultados mais interessantes, no ponto de vista da MQ, emergem quando a fonte está operando em regime monofotônico, ou seja, passando a emitir um fóton por vez. Com um fóton só sendo emitido, quando o anterior já atingiu o anteparo de detecção, emergem. No regime quântico, a intensidade não é mais tratada como a amplitude do campo elétrico, mas, sim, como

a quantidade de fótons emitidos pela fonte. A explicação a seguir baseia-se no trabalho de Ostermann e Prado (2005).

Na MQ, o estado de um fóton com energia E é determinado por uma função de onda complexa que pode ser escrita da seguinte forma, $\psi_{(x,t)} = Ce^{\pm i(kx - \omega t)}$, onde C é uma constante e representa a amplitude de probabilidade, e é o número de Euler, k é o número de onda, ω é a frequência e os sinais \pm indicam o sentido de propagação da onda em x .

De acordo com o formalismo da MQ, no regime monofotônico, o espelho S_1 é responsável por colocar o fóton em uma superposição de dois estados, ambos os estados correspondem ao caminho tomado pelo fóton, sendo que ele pode ser transmitido no caminho A e também refletido no caminho B. Dessa maneira, a possibilidade de o fóton percorrer o caminho A corresponde a um estado e a possibilidade de o fóton percorrer o caminho B corresponde ao outro estado. De acordo com Ostermann e Prado (2005), essas duas possibilidades são chamadas de autoestados do fóton no IMZ. O estado geral do fóton pode ser representado pela superposição dos autoestados, de forma que:

$$\Psi_{(x,t)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_A + \psi_B) \quad (8)$$

De acordo com as propostas de Einstein para o fóton, as duas possibilidades de caminho seriam excludentes ou ortogonais, sendo que o fóton pode seguir pelo caminho A ou B, com a mesma probabilidade (50%), e essa condição é posta no estado do fóton. Assim, o estado do fóton no espelho S_2 é apresentado em termos de autoestados:

$$\psi_A = Ce^{(ikx - i\omega t)} \quad e \quad \psi_B = Ce^{(ikx - i\omega t + \phi)} \quad (9)$$

em que ϕ é uma constante que indica a defasagem entre os caminhos ópticos A e B.

Dessa forma, pode-se encontrar a função densidade de probabilidade $|\Psi_{(x,t)}|^2$ de detecção do fóton em qualquer ponto do anteparo, através do Postulado de Born das probabilidades:

$$|\Psi_{(x,t)}|^2 = \frac{1}{2}|\psi_A + \psi_B|^2 = \frac{1}{2}|C|^2 (\psi_A^* + \psi_B^*)(\psi_A + \psi_B) \quad (10)$$

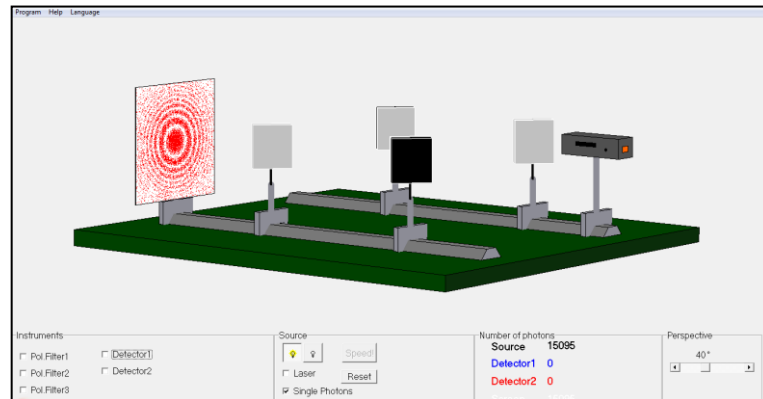
ψ_A^* e ψ_B^* representam o complexo conjugado de ψ_A e ψ_B . Substituindo-se as equações (5) em (6), após alguns passos algébricos, tem-se:

$$|\Psi_{(x,t)}|^2 = C^2 \cos^2(\phi/2). \quad (11)$$

Essa equação é matematicamente análoga à equação (6), obtida para a intensidade no estudo da interferência de ondas. Nesse caso, regiões onde $\phi = \pi$, com probabilidade nula de detecção para o fóton, sendo $\phi = 2\pi$, há probabilidade máxima para detecção do fóton. Ostermann e Prado (2005, p.198) ressaltam que “o processo de detecção do fóton no anteparo

é sempre pontual, mas um padrão de interferência se forma após a detecção de muitos fótons”, bem como mostra a Fig. 17, obtida após a experimentação com o *software*.

Figura 17 - IMZ em regime monofotônico. Ocorre a formação do padrão de interferência no anteparo.



Fonte: Extraído do próprio *software*.

Uma diferença importante entre a MC e a MQ trata da pré-determinação da posição do fóton, enquanto na MC, a posição do fóton pode ser pré-determinada, se dadas as condições iniciais. A MQ não permite predição em relação à posição de apenas uma única detecção, mas sim, uma predição probabilística para a detecção de muitos fótons.

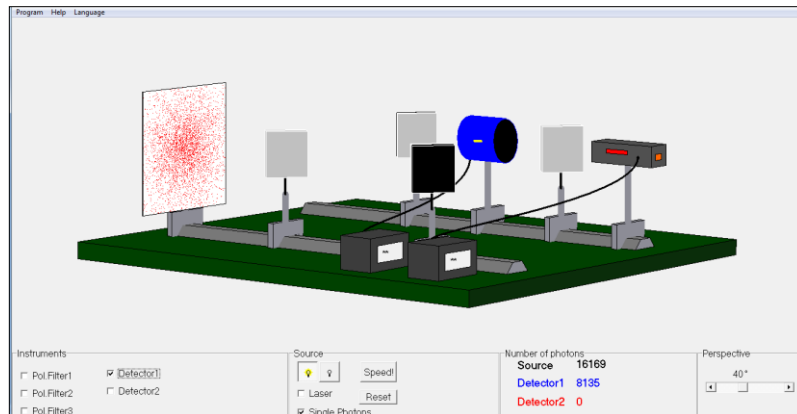
- **O IMZ em regime quântico com a presença de um detector**

Um observador, ao tentar realizar alguma medida por meio de certo mecanismo para descobrir por qual dos dois caminhos (A ou B) o fóton de Einstein seguiu, conseguirá verificar que ora os fótons percorrem um caminho e ora outro, mas, como resultado desse ato de observação, o fenômeno da interferência do fóton consigo mesmo desaparece, ou seja, “a possibilidade de detecção do caminho rumado pelo fóton destrói o padrão de interferência” (OSTERMANN; PRADO, 2005, p.199).

Para descobrir o caminho rumado pelo fóton no IMZ, basta inserir os detectores que o *software* fornece. Há possibilidade de inserir dois detectores, um em cada caminho. Ao ser detectado o fóton, ele é destruído e não chega ao anteparo. Ao colocar o detector 1 no caminho A, como mostra a Fig. 18, verifica-se que uma certa quantidade de fótons seguiu pelo caminho A. Como eles são absorvidos pelo detector, os fótons que chegam ao anteparo, necessariamente, rumaram pelo caminho B. Os resultados apresentam que aproximadamente 50% dos fótons emitidos pela fonte percorrem o caminho A, de acordo com os dados do detector 1, e que o restante dos fótons, seguramente, segue pelo caminho B, sendo que, ao chegarem ao anteparo,

não exibem mais interferência. A mesma experiência pode ser simulada com o detector 2 em B, e tem resultados totalmente equivalentes.

Figura 18 - IMZ em regime monofotônico com um detector no caminho A. Não há formação de padrão de interferência no anteparo.



Fonte: Extraído do próprio *software*.

Em outras palavras, quando se determina o caminho percorrido pelo fóton, altera-se a função de onda que o descreve, a nova função de onda não é mais uma superposição coerente de duas contribuições, mas descreve, agora, um corpúsculo bem localizado através da medida. Supõe-se, então, que a medida destrói a superposição coerente dos dois autoestados, e transforma o estado do corpúsculo em um estado localizado (OSTERMANN; PRADO, 2005, p. 199). Em termos de distribuição de probabilidades no anteparo, pode-se também considerar uma explicação análoga a expressa para o arranjo experimental da dupla fenda em regime quântico com a presença de um detector.

Em resumo ao que fora explorado nestas seções, podemos mencionar algumas considerações centrais a respeito da análise dos experimentos, levantadas por Feynman, Leighton e Sands (2008, p.20):

(1) A probabilidade de um evento num experimento ideal é dada pelo quadrado do valor absoluto de um número complexo ψ que é chamado de amplitude de probabilidade:

P = probabilidade,

ψ = amplitude de probabilidade,

$$P = |\psi|^2 .$$

(2) Quando um evento pode ocorrer com várias possibilidades (ambas as fendas da dupla fenda ou ambos os caminhos no IMZ), a amplitude de probabilidade para esse evento é a soma das amplitudes de probabilidade para cada caso separadamente. Existe interferência:

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 ,$$

$$P = |\psi_1 + \psi_2|^2 .$$

(3) Se um experimento realizado é capaz de determinar se uma outra possibilidade (passagem por uma das fendas ou trajetória por um dos caminhos) é obtida, então a probabilidade do evento é a soma das probabilidades de cada possibilidade. A interferência é perdida:

$$P = P_1 + P_2.$$

4.2.2 Os *Storyboards*

Com origem na informática, *storyboard* é um organizador sistemático de conteúdo gráfico, que, por sua característica de apresentar o conteúdo visualmente, em esboços, assemelha-se muito às histórias em quadrinhos. A sequencialização de informações permite explicar um processo, contar histórias, explicar mudanças pela passagem dos tempos. Esse gênero textual tem sido utilizado em outras áreas do conhecimento, como no ensino, sobretudo pelas mudanças estruturais e funcionais que a área (muito ligada ao cenário educacional) vem passando nos últimos tempos.

Para Vargas et al. (2007), *storyboards* são representações de cenas de um roteiro em forma de desenhos sequenciais, e tem o objetivo de tornar mais fácil a visualização das cenas antes que sejam gravadas. Costa (1998) divide a produção de *storyboards* em duas etapas essenciais: uma, que envolve os conteúdos propriamente ditos, ou seja, a informação e a sua própria organização interna; outra, que envolve o nível de configuração visual, que seria a aplicação do conteúdo integrada aos elementos multimídia. Assim, podemos dizer também que a produção de um *storyboard* é um trabalho de pesquisa, de seleção e organização de informação, e da forma visual que se dá a essa informação.

Na área do ensino, a finalidade de seu uso é criar um ambiente de aprendizagem que se destina a cumprir os objetivos pedagógicos a que foram determinados. Ainda para Costa (1998), a criação de um *storyboard* exige uma grande capacidade criativa aliada às capacidades de internalização da informação e ao conhecimento específico das potencialidades de criação multimídia. Para isso, o autor sugere 5 etapas principais: a) elaboração de resumo descritivo da aplicação; b) pesquisa e seleção de conteúdos; c) organização da informação e representação da estrutura da aplicação; d) desenho da interface; e) redação dos conteúdos e especificação dos elementos multimídia.

A exemplo da sua aplicação no ensino, a Física utiliza para tornar visível teorias diferentes sobre diversos conteúdos específicos, desde a Teoria do Big Bang até a trajetória de um projétil; a História utiliza para auxiliar estudantes a lembrar detalhes de eventos

historicamente importante e famosos; as Linguagens utilizam como auxílio na escrita de *papers*, em apresentações orais, ou ainda, para destacar aspectos importantes de histórias. Vale ressaltar, com base nesses exemplos e tendo, sobretudo, em vista o uso de *storyboards* em Física, especificamente, os *storyboards* auxiliam no ensino no sentido de facilitar a conversão de ideias complexas aos estudantes, e de forma mais concreta do que apenas falando ou escrevendo, o que auxilia na quebra de certas barreiras.

No que se refere ao uso de *storyboards* na ciência, selecionamos os trabalhos de Amaral et al. (2010), que o utilizaram num estudo sobre a elaboração de *softwares* educacionais com vistas a auxiliarem na aprendizagem. Benite et al. (2011) utilizaram *storyboard* em pesquisa sobre *cybercultura* no ensino em química, mais especificamente, no ensino de modelos atômicos através de aplicações computacionais. Américo (2016) fez uso de *storyboard* enquanto metodologia para criação de um objeto de aprendizagem gamificado no auxílio ao Ensino em Ciências. Silva e Souza (2013) utilizaram o *storyboard* no seu estudo sobre ensino-aprendizagem de Física Quântica.

A ideia da construção dos *storyboards*, bem como a modelização das representações presentes, surgiram a partir de estudos anteriores (TREVISAN; SERRANO, 2014; TREVISAN; SERRANO, 2016a; TREVISAN; SERRANO, 2016b; TREVISAN; SERRANO, 2018) nos quais verificamos resultados apontando que apenas as bancadas virtuais não forneciam representações conceituais a respeito dos possíveis comportamentos dos objetos quânticos ao longo dos *setups* experimentais, tanto para a dupla fenda, quanto para o IMZ.

Desta forma, com o intuito de preencher essa lacuna interpretativa e não a deixar apenas a cargo do estudante, ao tentar imaginar explicações conceituais plausíveis para justificar os padrões de interferência e não interferência formados no anteparo, decidimos elaborar ilustrações representacionais, que, com traços gráficos elementares, simbolizassem de maneira acessível as ideias de cada grande grupo interpretativo, para explicar os resultados empíricos. Procuramos manter o rigor conceitual, mesmo tendo consciência de que o mundo quântico não seja idealizado desta maneira.

As ilustrações foram realizadas a partir de modelizações baseadas nas conjecturas das quatro principais interpretações da MQ, são elas: Corpuscular (Realista), Ondulatória (Realista), Dualista Realista e a Dualista Positivista. Essa classificação ocorre de acordo com a referência principal adotada para toda elaboração do material didático. Para tanto, utilizamos as obras do físico e filósofo da ciência Osvaldo Frota Pessoa Junior, das quais, as mais consultadas foram de 1997, 2006 e 2008.

Uma introdução às quatro Interpretações da MQ

Antes de darmos continuidade à apresentação dos *storyboards*, consideramos que seja necessário primeiramente tecer uma introdução conceitual acerca dessas principais correntes interpretativas da TQ, uma vez que é uma característica notável dessa teoria o fato de ela ser interpretada de diferentes maneiras, com cada uma dessas interpretações se mostrando internamente consistente. Assim sendo, perguntas como “do que se trata o formalismo quântico?” e “a que se referem seus símbolos e equações?” possuem respostas distintas, pois dependem diretamente do ponto de vista (interpretação) tomado. Essa possibilidade de adoção de diferentes interpretações na MQ talvez possa ser considerada o cerne para o seu ensino.

De acordo com Montenegro e Pessoa Jr (2002, p.108), “existem dezenas de interpretações diferentes da Teoria Quântica, que podem ser agrupadas em quatro grandes grupos, conforme sua ontologia e atitude epistemológica”. Em seu trabalho, no qual buscam investigar as interpretações “privadas” que os alunos de MQ desenvolvem a respeito dessa teoria, isto é, averiguar quais as representações elaboradas pelos alunos durante a aprendizagem dos conceitos quânticos, os autores apresentam quatro grupos interpretativos:

Com relação à ontologia, uma interpretação pode conceber um objeto quântico de maneira corpuscular, ondulatória ou dualista. Quanto às atitudes epistemológicas, as duas básicas são realismo e positivismo. Com estas categorias, encontramos quatro grandes grupos interpretativos. Dentro de cada uma delas, mencionaremos uma versão “ingênua”, que pode ser apresentada com proveito em sala de aula (MONTENEGRO; PESSOA JR, 2002, p. 108).

Agora serão resumidamente descritas as quatro interpretações selecionadas por Pessoa Jr (1997, 2006, 2008) e Montenegro e Pessoa Jr (2002). Apesar dessas categorias serem exploradas nestes trabalhos, elas serão discutidas com base na obra de Pessoa Jr (2006).

I- Interpretação Ondulatória (realista): Esta interpretação considera a ideia de Erwin Schrödinger de que os objetos quânticos possuem uma ontologia ondulatória, aproximando-a da visão de John von Neumann, que introduz o fenômeno de colapsos de onda. Um objeto quântico é espalhado, ou seja, propaga-se como uma onda, contudo, quando ocorre a sua detecção, a onda passa a ser localizada, e torna-se um pacote pontual de energia, parecida a uma partícula. Diante desse cenário, surge a necessidade da aplicação da proposta de Neumann a respeito do colapso da função de onda ou redução do vetor de estado. Essa proposição pode ser explicada da seguinte forma: um estado $|\Psi\rangle$ pode ser escrito como a superposição de dois auto-estados $|\Psi\rangle = a_1|\psi_1\rangle + a_2|\psi_2\rangle$. Após a ocorrência de uma medição/detecção, o estado é

simplesmente reduzido ou para $|\psi_1\rangle$ ou para $|\psi_2\rangle$. O colapso ocorre, pois, no ato de medir, detecta-se, por exemplo, $|\psi_1\rangle$. Dessa forma, a probabilidade de detecção de $|\psi_2\rangle$ se anula imediatamente. Logo, durante certo período, tem-se uma onda espalhada, e, em seguida, tem-se uma partícula, “sem que ambas coexistam simultaneamente” (PESSOA JR, 2006, p.5). Manifesta-se um problema conceitual, visto que tais colapsos são “não-locais”, ou seja, envolvem propagação de informação com velocidade infinita. Para contornar essa problemática, Pessoa Jr (2006) cita que Neumann não associava a função de onda a uma realidade, isto é, sua postura era positivista: a função de onda representaria apenas o conhecimento adquirido pelo ser humano. No entanto, a consequência dessa interpretação é a visão realista, os objetos quânticos, por exemplo, correspondem a algo real da natureza, independente da sua observação, diante deste cenário considera-se o fóton como um pacote de onda. De acordo com Ostermann e Prado (2005) esse formalismo acabou sendo amplamente adotado em livros-textos por razões didático-pedagógicas, pelo fato de abordar analogias com situações semelhantes aos ramos particulares da FC.

II- Interpretação Corpuscular (realista): Esta interpretação considera as entidades microscópicas (ou pelo menos as possuidoras de massa de repouso) como partículas, atribui uma ontologia corpuscular aos objetos quânticos sem nenhuma propriedade ondulatória associada a eles. O fóton e o elétron seriam, na realidade, partículas, comportamento esse manifestado quando detectados. De acordo com Pessoa Jr (2006), essa posição foi defendida com veemência por Alfred Landé, dentro da “interpretação dos ensembles (coletivos) estatísticos”, na qual um vetor de estado representa a média sobre todas as posições possíveis para a partícula. A principal dificuldade da abordagem corpuscular é explicar os fenômenos tipicamente ondulatórios, como, por exemplo, os padrões de interferência e difração, visualizados no experimento da dupla fenda. Uma explicação para o surgimento desses fenômenos é a de que o anteparo interage ao dar pequenos impulsos nas partículas que resultam transferências quantizadas de *momentum*, originando assim os padrões observados. Ainda que esse problema não tenha sido superado satisfatoriamente, as interpretações corpusculares são encontradas na literatura e com maior imposição entre os alunos. Pessoa Jr (2006) ressalta que a interpretação implícita ao se usar a Lógica Quântica torna-se um exemplo da versão corpuscular.

III- Interpretação Dualista Realista: Esta interpretação foi formulada originalmente por De Broglie, em sua teoria da “onda piloto”, sendo redescoberta e ampliada por Bohm em torno de 1952 para incluir o aparelho de medição (PESSOA JR, 2006). Nessa interpretação, atribui-se ao objeto quântico uma ontologia dual, isto é, o considera sendo constituído por duas

partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas em geral desconhecida) e uma onda a ela associada. Ou seja, essa interpretação busca conciliar o fenômeno ondulatório com o fenômeno corpuscular na mesma experiência. Na visão dualista realista cada sistema quântico é descrito pelo estado Ψ e composto por estados adicionais ocultos rotulados por um parâmetro λ sendo este uma partícula com posição e velocidade bem determinadas (PESSOA JR, 2006). O estado Ψ seria uma onda piloto ou um campo de probabilidades que conduz a partícula, sendo que a energia está presente somente na partícula. Ψ e λ juntos determinam o resultado da medida de um observável no sistema. A probabilidade da partícula se propagar em certa direção depende da amplitude de sua onda associada. Assim, quando ocorre uma superposição destrutiva em uma determinada região, a probabilidade de encontrar a partícula nessa região é praticamente zero, sendo nula quando ocorre um cancelamento total das ondas associadas. Um problema surge com a “porção não detectada”, isto é, ainda que a partícula seja detectada, uma parte da sua onda piloto, com menor amplitude, nunca é detectada. Para resolver esse problema, recomendou-se a onda piloto como sendo uma onda considerada “vazia”, dessa maneira não conteria matéria, nem energia e nem carga elétrica, ela seria apenas uma “onda de informação” que guiaria o corpúsculo em sua trajetória contínua pelo espaço. Além de guiar o corpúsculo, a expressão matemática da onda vazia, quando elevada ao quadrado, também fornece a probabilidade de se encontrar a partícula em um dado ponto (PESSOA JR, 2006). Nessa interpretação, o problema da não-localidade só se manifesta quando são consideradas duas partículas correlacionadas. Simplificando, os objetos quânticos são considerados partículas as quais se associam ondas de matéria/ondas piloto.

IV- Interpretação Dualista Positivista: Também conhecida como Escola de Copenhague, designa especialmente a interpretação da complementaridade de Niels Bohr por volta do ano de 1928. Esta abordagem reconhece a limitação na capacidade do ser humano representar a realidade microscópica por meio de conceitos da física clássica, ainda que esses sejam usados para interpretar os resultados experimentais. Conforme o experimento, pode-se utilizar ou uma descrição ondulatória ou uma corpuscular, mas nunca ambas ao mesmo tempo. Pessoa Jr (2006) ressalta que não significa, porém, que o objeto quântico seja um corpúsculo, ou seja, uma onda, pois, segundo qualquer abordagem positivista dentro do contexto da física, só se pode afirmar a existência das entidades e atribuir qualquer ontologia a elas até que sejam observadas. Assim, afirmar que um “objeto quântico (fóton ou elétron, por exemplo) não-observado pode sofrer um colapso”, carece de sentido. Dessa maneira, um fenômeno ondulatório é caracterizado pela observação de um padrão de interferência e um corpuscular pela possibilidade de induzir uma trajetória bem definida. Mesmo em fenômenos tipicamente

ondulatórios, as detecções são pontuais (considerada pela interpretação II como uma das maiores evidências da natureza corpuscular dos objetos quânticos). De acordo com Pessoa Jr (2006), essa contradição é solucionada ao adotar o “postulado quântico” descoberto por Planck, e considerado por Bohr, o fundamento da TQ. Tal postulado afirma que toda detecção é fatalmente pontual, isto é, afirma a existência de uma “descontinuidade essencial em qualquer processo atômico” (PESSOA JR, 2006 p. 6). Um estado $|\Psi\rangle$ também não possui classificação ontológica, considerado apenas como um instrumento matemático de predição e cálculo, desprovido de realidade física. Salienta-se, ainda, a existência de diversas variações dessa abordagem, com as chamadas interpretações “ortodoxas”. Em síntese, a consequência direta desta interpretação é que nada se pode dizer a respeito do comportamento dos objetos quânticos, por exemplo, em um experimento antes da detecção destes objetos. Somente após a detecção pode-se então concluir se o comportamento assumido foi ondulatório ou corpuscular.

Por meio dessas interpretações, é possível discutir os fundamentos epistemológicos e ontológicos dos objetos quânticos, e construir, assim, uma reflexão acerca do processo de construção científica, traçando as diversas soluções e suas lacunas diante dos resultados obtidos experimentalmente.

Retornando com o direcionamento do texto para os fundamentos teóricos e metodológicos dos *storyboards*, ressaltamos que eles contemplam apenas o arranjo experimental da dupla fenda em todas suas configurações (elencadas nas seções anteriores). Optamos por não mencionar as explicações para o IMZ, para que após tal implementação fosse possível analisar se os estudantes alcançaram uma própria modelização científica a partir dessas mediações externas para o IMZ e se expressaram, assim, com mais ênfase, a sua interpretação privada para os comportamentos dos objetos quânticos.

Não é o foco deste estudo tratar se a aprendizagem ocorrida é significativa sob o ponto de vista Ausubeliano. No entanto, acreditamos que se o aluno, frente a uma nova situação, consegue utilizar os subçunsores modificados para resolver tal problema, essa compreensão flerta com a aprendizagem significativa (AUSUBEL, 1968).

Os *storyboards* seguem uma sequência para cada grupo interpretativo, e, basicamente, respondem a quatro perguntas centrais, a saber:

- Qual é a interpretação do Estado Quântico (epistêmico ou real)?
- Como surgem as franjas claras e escuras (regiões “permitidas” ou “não”)?
- Como um observador pode interferir no resultado obtido no anteparo?
- Como a interpretação encara o “problema” da não-localidade?

Na sequência, serão apresentadas as ilustrações representativas acerca de cada interpretação, na tentativa de explicar conceitualmente, através de suas conjecturas, os resultados observados no anteparo do arranjo experimental da dupla fenda. Em virtude da extensão dos conceitos apropriados por cada interpretação, as explanações a seguir estão descritas de maneira sintetizada, para aprofundamento teórico, sugerimos ao leitor a consulta das obras de Pessoa Jr (2006, 2008).

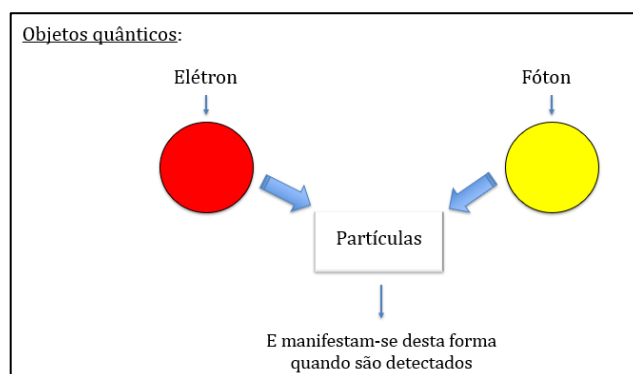
Iniciaremos com a exposição das proposições relacionadas à Interpretação Corpuscular (Realista).

- **Interpretação Corpuscular (Realista)**

Caso I - A caracterização da entidade quântica e interpretação do estado quântico $|\psi\rangle$:

O elétron e o fóton são partículas (Fig. 19) e manifestam-se desta forma quando são detectados.

Figura 19- Recorte do *storyboard*. Ilustração do objeto quântico sob o ponto de vista da Interpretação Corpuscular.



Fonte: O autor.

E a interpretação para o estado quântico:

$|\psi\rangle \rightarrow$ Epistêmico.

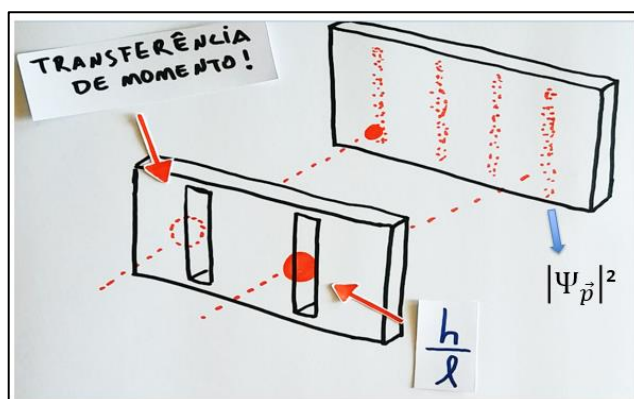
$|\psi\rangle \rightarrow$ Incompleto (não se aplica a um objeto individual).

Caso II - A formação do padrão de interferência no anteparo na ausência de um detector:

Quando uma partícula interage com um cristal de comprimento l , o momento da partícula pode alterar em múltiplos de h/l , ou seja, as fendas transfeririam momento de forma

quantizada para o elétron (Fig. 20), o que ocasionou o padrão de interferência. Tal explicação só serviria para arranjos experimentais com anteparos rígidos, e não para outros tipos de experimentos, como o biprisma eletrônico (PESSOA JR, 2006).

Figura 20 - Recorte do *storyboard*. Ilustração da ocorrência do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Corpuscular.



Fonte: O autor.

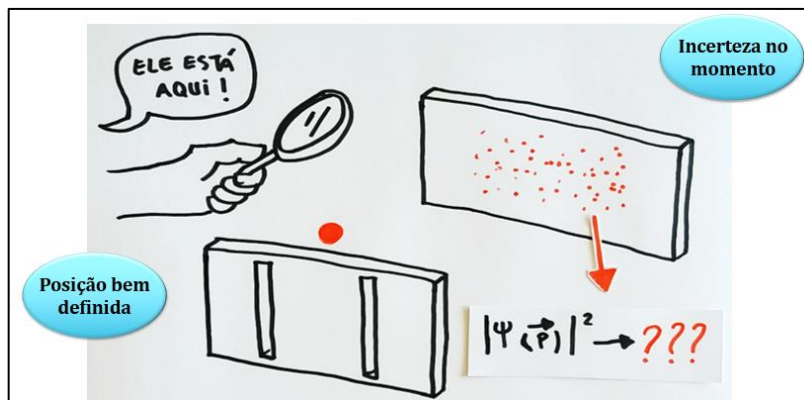
Ressaltamos que essa imagem não é a única utilizada para explicar as ideias da interpretação, não apresentaremos as demais, que complementam a sequência, devido à preocupação com a extensão deste manuscrito¹⁷.

Caso III - A desconstrução do padrão de interferência devido à presença de um detector:

A não formação do padrão de interferência é considerada normal, a detecção no anteparo é pontual, caracteriza o comportamento corpuscular do objeto quântico. A distribuição das marcações no anteparo é essencialmente justificada pelo princípio da incerteza, isso quer dizer que, ao detectar a partícula, obtém-se sua posição de forma bem definida e, conseqüentemente, acontece uma alteração no momento, fazendo com que o corpúsculo rume para pontos indefinidos no anteparo (Fig. 21).

¹⁷ Todo o material elaborado e utilizado nas instruções didáticas está disponível em: <shorturl.at/hEK78>.

Figura 21 - Recorte do *storyboard*. Ilustração da desconstrução do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Corpuscular.



Fonte: O autor.

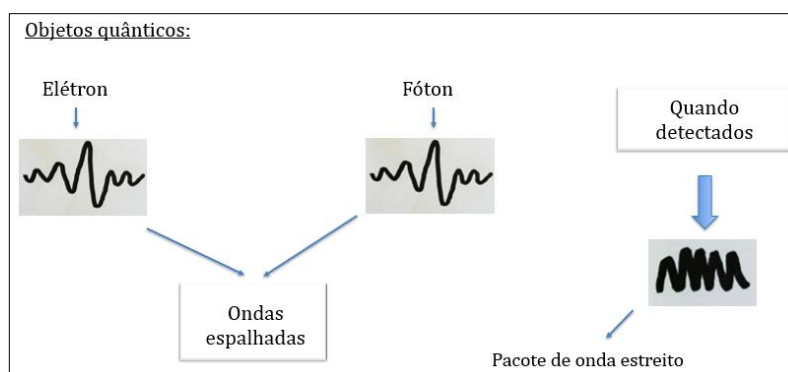
Essa interpretação não trata do problema da não-localidade, tendo em vista a não consideração da superposição de estados e nem colapso da função de onda meramente estatística.

- **Interpretação Ondulatória (Realista)**

Caso I - A caracterização da entidade quântica e interpretação do estado quântico $|\psi\rangle$:

O elétron e o fóton são ondas espalhadas e quando detectados tornam-se um pacote de onda estreito, conforme Fig. 22.

Figura 22 - Recorte do *storyboard*. Ilustração do objeto quântico sob o ponto de vista da Interpretação Ondulatória.



Fonte: O autor.

E a interpretação para o estado quântico:

$|\psi\rangle \rightarrow$ Real.

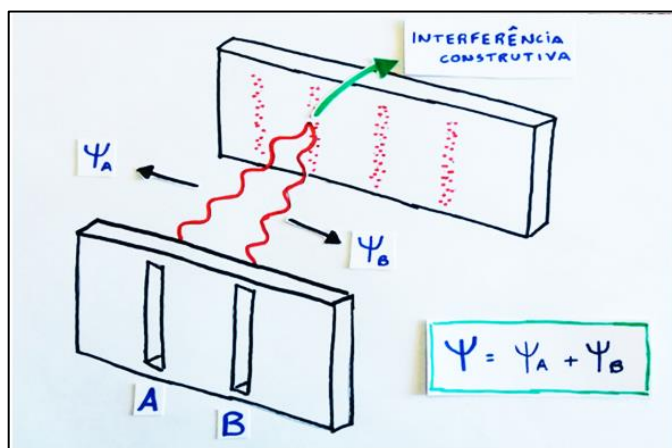
$|\psi\rangle \rightarrow$ Completo.

Portanto, atribui realidade à função de onda $\Psi_{(x,t)}$, não considera que exista algo além do formalismo quântico. Trata de uma realidade em termos de potencialidade, e estabelece apenas probabilidades (mesmo assim, evolui no tempo como uma onda).

Caso II - A formação do padrão de interferência no anteparo na ausência de um detector:

Após atravessar as fendas, o pacote de onda associada ao elétron se divide em dois (Fig. 23), o que pode ser expresso por uma função de onda do tipo $\psi_A + \psi_B$. As franjas claras e escuras acontecem devido à diferença de fase das frentes de ondas associadas ao elétron, originadas após passarem pelas fendas.

Figura 23 - Recorte do storyboard. Ilustração da ocorrência do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Ondulatória.



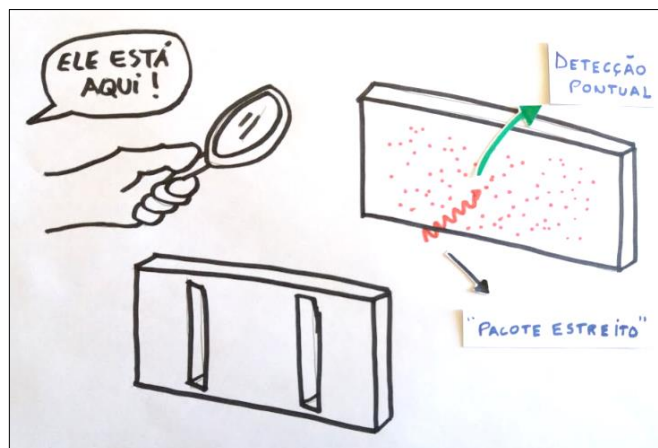
Fonte: O autor.

Em outras situações, as ondas foram representadas em formato circular, uma outra possibilidade de representar o objeto quântico com ontologia ondulatória. Ambas podem sinalizar a mesma intenção conceitual ilustrativa.

Caso III - A desconstrução do padrão de interferência devido à presença de um detector:

Sempre que uma medição é realizada e um resultado é obtido, a onda ψ , previamente espalhada, sofre uma redução súbita passando a se localizar próximo de onde ela foi detectada, formando um “pacote de onda” semelhante a uma partícula (Fig. 24). Segue a ideia do colapso da função de onda proposta por Neumann (postulado da projeção).

Figura 24 - Recorte do *storyboard*. Ilustração da desconstrução do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Ondulatória.



Fonte: O autor.

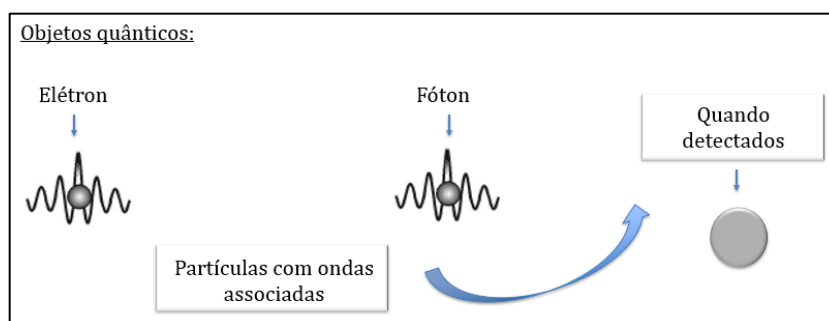
Por conta da superposição de estados e colapso da função de onda, considera-se o “problema” da não localidade, já que a redução do pacote de onda por si só já estaria associada a uma ação à distância ou efeito não-local.

- **Interpretação Dualista (Realista)**

Caso I - A caracterização da entidade quântica e interpretação do estado quântico $|\psi\rangle$:

O elétron e o fóton são partículas com ondas associadas (pilotos) (Fig. 25) e somente a porção corpuscular é detectada no anteparo.

Figura 25 - Recorte do *storyboard*. Ilustração do objeto quântico sob o ponto de vista da Interpretação Dualista Realista.



Fonte: O autor.

E a interpretação para o estado quântico:

$|\psi\rangle \rightarrow \text{Real.}$

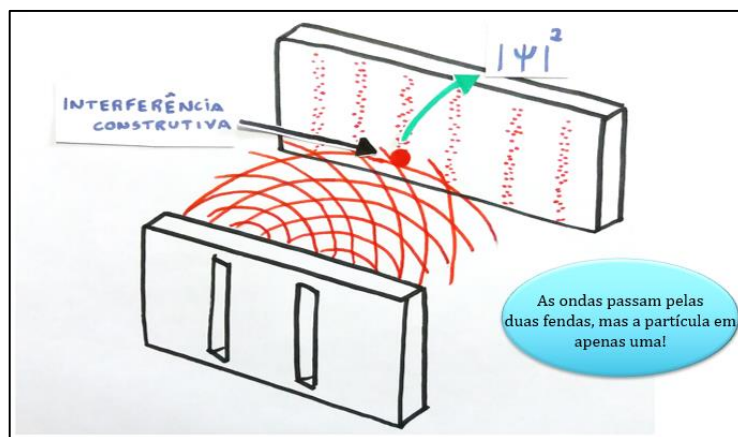
$|\psi\rangle \rightarrow$ Incompleto (variáveis ocultas).

O estado $|\psi\rangle$ exprime um campo real que “guia/conduz” a partícula, chamada de “onda piloto”. É considerada uma onda vazia em termos energéticos, a energia estaria concentrada na partícula. Cada sistema quântico individual, descrito pelo estado Ψ , é também caracterizado por estados adicionais ocultos rotulados por um parâmetro λ , que seria a partícula com posição e velocidade bem determinadas. A energia estaria concentrada na partícula. Ψ e λ juntos determinam o resultado da medida de um observável no sistema. Simplificando, o elétron é considerado uma partícula a qual se associa uma onda de matéria (ou onda piloto).

Caso II - A formação do padrão de interferência no anteparo na ausência de um detector:

O objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida) e uma onda associada (Fig. 26). As ondas passam pelas duas fendas, mas a partícula em apenas uma, seguindo por caminhos possíveis, sendo estes os pontos em que as suas “ondas piloto” interferem construtivamente.

Figura 26 - Recorte do *storyboard*. Ilustração da ocorrência do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Dualista Realista.



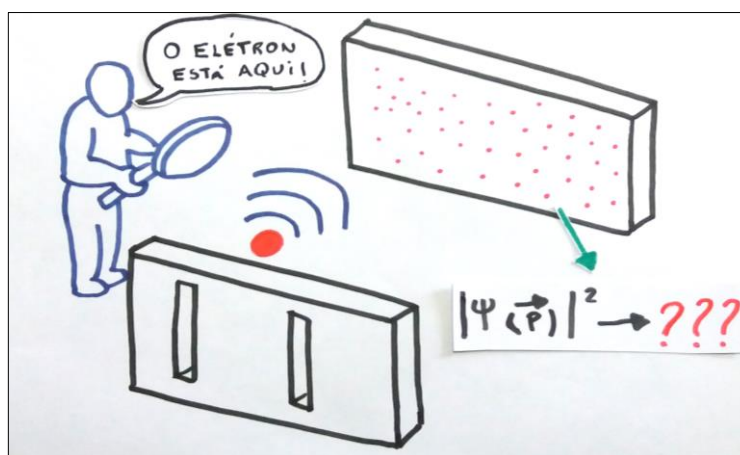
Fonte: O autor.

A probabilidade da partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude da onda associada $|\Psi|^2$, em regiões onde as ondas interferem destrutivamente, não há um caminho possível, logo, não se encontram as partículas.

Caso III - A desconstrução do padrão de interferência devido à presença de um detector:

Medições de posições são fidedignas revelam o valor possuído antes da medição. No entanto, tal medição provoca alteração rapidíssima na onda associada, o que afeta o momento de maneira imprevisível (a alteração na onda dependeria do estado microscópico do aparelho de medição, o que nunca é conhecido pelo cientista) (Fig. 27). As reduções de estado resultam sempre num autoestado de posição, de forma que essas reduções podem ser interpretadas como a mera detecção da partícula presente em algum lugar da onda piloto.

Figura 27 - Recorte do *storyboard*. Ilustração da desconstrução do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Dualista Realista.



Fonte: O autor.

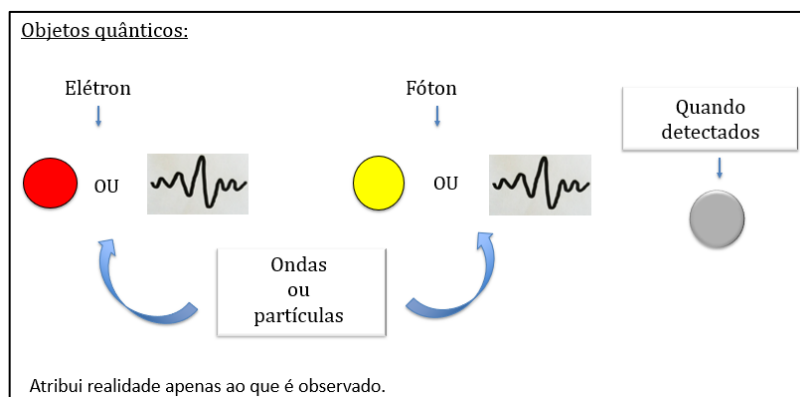
No nível ingênuo de um curso introdutório, essa abordagem está livre do problema da não-localidade, pois esse problema só surge quando se considera duas partículas correlacionadas. Ao descrever duas partículas interagentes que se separam a uma grande distância, é necessário estipular uma “ação à distância”, ou seja, o ato da medição feito em uma partícula afetaria instantaneamente a onda localizada a uma grande distância.

- **Interpretação Dualista Positivista**

Caso I - A caracterização da entidade quântica e interpretação do estado quântico $|\psi\rangle$:

O elétron e o fóton podem ser ondas ou partículas, essa interpretação atribui realidade apenas ao que é observado. Quando detectadas, as entidades quânticas se manifestam como corpúsculos (Fig. 28).

Figura 28 - Recorte do *storyboard*. Ilustração do objeto quântico sob o ponto de vista da Interpretação Dualista Positivista.



Fonte: O autor.

E a interpretação para o estado quântico:

$|\psi\rangle \rightarrow$ Epistêmico.

$|\psi\rangle \rightarrow$ Completo.

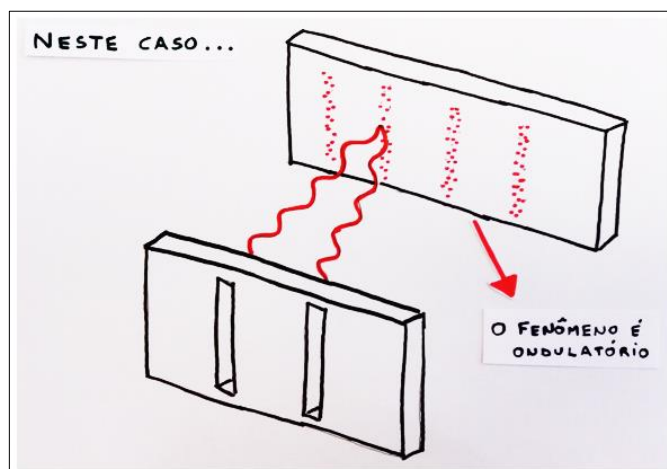
O estado $|\psi\rangle$ é meramente um instrumento matemático para realizar cálculos e obter previsões (não é real). Considera como a descrição mais completa de um objeto quântico individual. Inclinação epistemológica positivista, considera que não se pode medir o estado de um objeto quântico (sem informações a respeito de sua preparação).

Caso II - A formação do padrão de interferência no anteparo na ausência de um detector:

De acordo com o Princípio da Complementaridade de Bohr, um experimento quântico pode ser representado ou em um quadro corpuscular ou em um quadro ondulatório, nunca em ambos ao mesmo tempo. Esses aspectos da experiência seriam mutuamente excludentes.

Nessa configuração experimental sem a presença de um detector, ocorre o padrão de interferência, portanto, o comportamento do objeto quântico é ondulatório (Fig. 29). Logo, o elétron ou fóton em questão combinam-se consigo mesmo construtivamente nas regiões de detecção e destrutivamente nas regiões onde o fóton não é detectado.

Figura 29 - Recorte do storyboard. Ilustração da ocorrência do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Dualista Positivista.



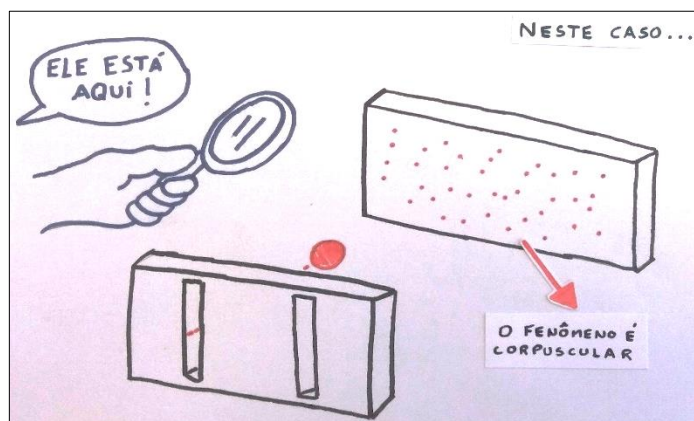
Fonte: O autor.

O fenômeno em questão é ondulatório e não corpuscular, não se pode inferir a trajetória do objeto quântico detectado. Na linguagem da MQ, pode-se dizer que o elétron está em um estado de superposição quântica descrito pela equação $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\psi_A\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |\psi_B\rangle$.

Caso III - A desconstrução do padrão de interferência devido à presença de um detector:

Uma determinação exata do valor de um observável como a posição x de um elétron implica numa falta de exatidão na definição do valor da grandeza conjugada, no caso do momento p_x do elétron. A medição provoca um distúrbio incontrolável no objeto quântico (perda de coerência entre as componentes que representam o elétron que rumou por A ou B), impedindo a existência de um padrão estável de interferência (Fig. 30).

Figura 30 - Recorte do *storyboard*. Ilustração da desconstrução do padrão de interferência sob o ponto de vista da Interpretação Dualista Realista.



Fonte: O autor.

A redução brusca e imprevisível do estado quântico durante uma medição apenas reflete o distúrbio incontrolável que o aparelho de medição exerce sobre o objeto, $|\psi\rangle$ reduz $\rightarrow |\psi_A\rangle$ ou $|\psi_B\rangle$. A interpretação evita paradoxos, como o do colapso não-local simplesmente suspendendo o juízo acerca de qualquer parte não-observada da realidade. Ou seja, só faria sentido se referir à realidade *observada*, como as ionizações dos detectores, e não ao estado quântico ψ , os colapsos seriam meramente reduções de estado, reduções formais, simbólicas, e não reais. Assim, a não localidade associada aos colapsos não são problemáticos.

Apresentados os aspectos interpretativos acerca do fenômeno da dualidade onda-partícula, a seguir, serão tratados os delineamentos metodológicos adotados por este estudo.

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

Neste capítulo, será descrita a pesquisa no âmbito metodológico a fim de justificar o conjunto de ações que fizeram parte do seu constructo, de forma a embasar os desdobramentos que darão sustentabilidade à investigação conduzida. Sendo assim, a estrutura desta proposta metodológica converge para caminhos que tornem possível a identificação e a análise das representações mentais e *drivers* dos licenciandos em física após a realização de atividades didáticas apoiadas por mecanismos externos de mediação compostos por *softwares* educacionais e *storyboards* carregados de ilustrações específicas.

5.1 O DIRECIONAMENTO À PESQUISA QUALITATIVA (INTERPRETATIVA)

A metodologia da pesquisa em Ensino de Ciências é semelhante à pesquisa em Educação, e essa foi dominada, ao longo do século XX, por dois paradigmas clássicos: um, inspirado na metodologia das ciências naturais, que enfatiza observações empíricas quantificáveis e adequadas para tratamentos estatísticos; o outro, derivado da área humanística, com ênfase em informações holísticas e qualitativas e em abordagens interpretativas (ERICKSON, 1986; BOGDAN; BIKLEN, 1999; YIN, 2001; FLICK, 2009; APPOLINÁRIO, 2012).

Nos desdobramentos propostos por esta investigação, tomamos o ser humano como o foco principal de estudo, tendo em vista a intenção de verificar as representações mentais e *drivers* utilizados ao longo do processo de resolução de problemas relacionados com a dualidade onda-partícula de entidades quânticas na estrutura cognitiva do estudante, atentando para as suas articulações que supostamente designam o processo de modelização científica e a aproximação da interpretação privada adotada. Em vista disso, optamos pela apropriação de métodos qualitativos para arquitetar e executar o processo de produção dos dados e para o movimento de análise e repercussão dos resultados.

Essa escolha acontece devido às características estruturais da investigação qualitativa em educação, das quais Bogdan e Biklen (1999) elegem cinco atributos fundamentais permeados por estudos de cunho qualitativo, sendo que não necessariamente esses atributos são espelhados com a mesma eloquência por todas as pesquisas consideradas qualitativas. Na sequência da seção, listaremos os temas elencados pelos autores e estabeleceremos uma relação com a realidade assistida em nosso trabalho.

1. “*Na investigação qualitativa a fonte direta de dados é o ambiente natural, constituindo o investigador o instrumento principal*”. Nesta direção, Bogdan e Biklen (1999) sinalizam a introdução do pesquisador no ambiente da pesquisa, podendo ser em escolas, famílias, bairros e outros locais, na tentativa de elucidar as questões educativas, há também o entendimento de que as ações podem ser melhores compreendidas quando observadas no ambiente natural de sua ocorrência. Quanto à obtenção dos dados, seja ela realizada em interações na sala de aula, utilizando equipamentos de vídeo, recorrendo a entrevistas, mediante observação participante, entre outras, os autores reiteram que os investigadores qualitativos assumem o comportamento humano como influenciado de forma expressiva pelo contexto em que ocorre.

Em nosso estudo, o campo de investigação concentrou-se na sala de aula, local em que as atividades propostas¹⁸ foram conduzidas. As ações pedagógicas e o contexto acadêmico são levados em consideração no momento de identificar as mediações responsáveis pela construção e/ou modificação das representações mentais e *drivers* dos estudantes.

2. “*A investigação qualitativa é descritiva*”. Logo, Bogdan e Biklen (1999) explicam que os dados obtidos são em forma de palavras ou imagens e não de números. Os dados incluem transcrições de entrevistas, notas de campo, fotografias, vídeos, documentos pessoais, memorandos e outros registros oficiais. Na questão dos resultados, estes são descritos com citações embasadas nos dados para ilustrar e substanciar a sua apresentação. Com o intuito de alcançar o conhecimento, os pesquisadores não reduzem o volume de páginas das narrativas e demais dados a símbolos numéricos, buscam analisar os dados em toda a sua riqueza, respeitando o máximo possível a forma com que estes foram registrados ou transcritos. Neste tocante, os autores ressaltam que a investigação qualitativa exige o exame do mundo com a ideia de que nada é trivial, e que todas as informações existentes são potenciais na construção de evidências que conduzam o pesquisador a estabelecer compreensões acerca do objeto de estudo. Portanto, ao se obter dados descritivos, a investigação qualitativa aborda o mundo de forma minuciosa.

Em diferentes momentos da condução de nossa investigação, foram utilizados instrumentos¹⁹ que promovessem o levantamento de dados descritivos suficientes para o subsídio da análise. Os testes e as guias de instrução para as atividades com as bancadas virtuais são compostos basicamente por questões abertas que exigem do estudante uma carga conceitual

¹⁸ A descrição detalhada das etapas dos procedimentos e da análise realizados ao longo do percurso da investigação será apresentada na seção 5.5.

¹⁹ Os instrumentos para a produção dos dados são apresentados na seção 5.4.

e interpretativa. Além disso, um dos diferenciais desta investigação é a utilização do método *Report Aloud* (TREVISAN et al., 2019), no qual se estabelece um diálogo entre pesquisador e aluno, pauta nas respostas dos testes, em que o aluno descreve os caminhos que o levaram à resolução e compreensão dos problemas. O diálogo é gravado em áudio e vídeo para que fique registrada a linguagem verbal e gestual dos licenciandos. Tanto o discurso verbal quanto o gestual descritivo são relevantes tendo em vista o movimento de análise proposto por esta investigação. Sendo assim, as representações mentais e *drivers* empregados na interpretação do fenômeno da dualidade onda-partícula podem ser identificadas e examinadas.

Assim, todas as informações são levadas em consideração na construção de evidências para a compreensão das interpretações adotadas pelos estudantes. Os resultados são lidos com o auxílio do referencial teórico-epistemológico a partir de uma triangulação de dados oriundos das respostas escritas nos testes, da linguagem verbal e da linguagem gestual descritiva

3. “*Os investigadores qualitativos interessam-se mais pelo processo do que simplesmente pelos resultados ou produtos. A ênfase qualitativa no processo tem se consolidado na investigação educacional, Bogdan e Biklen (1999) apontam o segmento no qual se estabelece a ideia de que o desempenho cognitivo dos alunos é influenciado pelas atividades, pelos procedimentos e pelas interações diárias dos professores. Sendo assim, os investigadores qualitativos interessam-se pela busca de respostas, por exemplo, para as seguintes perguntas: Como é que os alunos articulam suas concepções? Como certos termos e significados começaram a ser utilizados? Qual é a história natural da atividade ou o acontecimento que se pretende estudar? As respostas para esses questionamentos podem ser alcançadas por meio dos delineamentos metodológicos qualitativos, nos quais os pesquisadores levantam repercussões no solo estratégico da pesquisa a partir do processo em que os resultados foram se constituindo, sendo este ambiente o âmago da observação do pesquisador.*

No percurso de nossa investigação, procuramos compreender como as representações mentais e *drives* foram construídos e/ou modificados para que a modelização científica acontecesse a ponto de estruturar a manifestação de uma postura interpretativa do aluno, diante de um fenômeno quântico, como o da dualidade onda-partícula. Desta forma, empenhamo-nos, durante o *Report Aloud*, principalmente na identificação dos mecanismos externos que mediaram o desenvolvimento conceitual do estudante, verificamos potencialmente o conjunto de ações e artefatos pedagógicos ou não que influenciaram no processo de aprendizagem.

4. “*Os investigadores qualitativos tendem a analisar os seus dados de forma indutiva. Isto é, os dados ou as provas não são obtidos com o propósito de inferir ou confirmar hipóteses elaboradas previamente, ao contrário disso, os pesquisadores constroem abstrações a partir do*

agrupamento dos dados particulares (BOGDAN; BIKLEN, 1999). Os autores ressaltam que uma teoria desenvolvida desse modo segue a direção de “baixo para cima” ao se estabelecer uma inter-relação entre as peças individuais de informação recolhidas. Bogdan e Biklen (1999) comparam a direção da análise ao ato de construir um quebra-cabeça, no qual a figura final não é conhecida, que só ganha forma após as peças serem precisamente examinadas. O movimento de análise dos dados é parecido com um funil: no início da pesquisa, os pontos a serem observados são amplos e estão espalhados, e, paulatinamente, com os desdobramentos da análise, esses pontos tornam-se mais restritos e específicos.

Seguindo esse pressuposto dirigido ao processo de análise, nosso estudo considera as representações mentais e *drivers* dos licenciandos em Física como sendo peças de um quebra-cabeça que se encaixam na modelização científica inconsciente, e culminam na formação de uma interpretação privada, não conhecida e não podendo ser determinada previamente, sendo que a origem de cada uma dessas peças também é desconhecida, mas contribui diretamente para a formação final de uma imagem. A origem e a estruturação das representações mentais e *drivers*, bem como as suas articulações no instante de compreensão e resolução de um problema tornam-se a engrenagem central do mecanismo de análise, a qual pretendemos construir para alcançar as respostas ao nosso problema de pesquisa.

5. “*O significado é de importância vital na abordagem qualitativa*”. Em educação, as pesquisas buscam compreender e registrar as perspectivas e os significados dos sujeitos para as experiências vivenciadas. Os investigadores estão interessados no modo como as pessoas dão sentido e estruturam o mundo social em que vivem. Bogdan e Biklen (1999) mencionam os métodos de certificações dos pesquisadores para a observação precisa das diferentes perspectivas, como o uso de vídeo e a sua exibição aos participantes, para que haja uma comparação inicial das interpretações do informante e do pesquisador, a exposição de transcrições e também uma discussão a fim de esclarecer possíveis pontos divergentes nas informações passadas e recebidas (compreendidas).

O método do *Report Aloud*, utilizado em nosso percurso metodológico, possibilita o estabelecimento de um diálogo, no qual o pesquisador busca extrair detalhadamente a visão do sujeito acerca do conteúdo a ser explorado, que o relaciona em boa parte com as vivências acadêmicas e sociais que construíram seus significados. Dessa forma, reduz-se possíveis incompatibilidades entre as informações passadas e recebidas. O acesso e a compreensão das perspectivas dos alunos ocorrem em maior acentuação nessa etapa do processo. Além do mais, os momentos de convivência em sala de aula durante as interações com as bancadas virtuais e

os *storyboards* também contribuem na observação ativa e análise das perspectivas e dos significados dos alunos para as experiências vivenciadas neste plano.

Tendo em vista essas cinco características estruturais da investigação qualitativa em educação propostas por Bogdan e Biklen (1999), consideramos que a adoção da abordagem qualitativa em nosso estudo tenha sido alinhada com os objetivos propostos no andamento de formar respostas ao problema inicial da pesquisa. Ainda quanto à competência fundamental da pesquisa qualitativa, Erickson (1986) menciona a sua perspectiva direcionada às ações e aos critérios de validades tendo significados imediatos definidos como ponto de vista de seus próprios autores, uma vez que esse método procura a explicação interpretativa através do estudo detalhado de um caso único ou através de comparação com outros estudos semelhantes.

5.2 O ESTUDO DE CASO COMO ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Em um estudo analítico, de acordo com Bogdan e Biklen (1999), as decisões são tomadas à medida que este avança. Essas decisões perpassam na definição de um método de estudo, já que, para uma investigação qualitativa, existem diferentes tipos, cada um implica em métodos específicos para avaliar a viabilidade do seu emprego e em seguida os procedimentos a serem adotados (ERICKSON, 1986).

O objetivo da nossa investigação concentra-se no exame das representações mentais e *drivers* dos licenciandos em Física ao longo do processo de compreensão conceitual dos resultados observados no experimento da dupla fenda e no IMZ. Portanto, julgamos adequado metodologicamente a adoção do estudo de caso (YIN, 2001) no planejamento e na execução da pesquisa, devido as suas particularidades e potencialidades na pesquisa qualitativa em educação.

De acordo com Yin (2001), o uso do estudo de caso é apropriado quando se pretende investigar o “Como?” e o “Por quê?” da ocorrência de um fenômeno singular ou um conjunto de eventos contemporâneos a partir do seu contexto real. Nesta perspectiva, Lüdke e André (1986) indicam o estudo de caso quando se há o interesse em algo particular e único de um cenário escolhido, mesmo que posteriormente venham a ficar evidentes certas semelhanças ou situações com outros casos ou situações. Em resumo, o estudo de caso possibilita que uma investigação preserve ao máximo as características holísticas e significativas dos eventos em seu contexto (YIN, 2001).

No escopo generalizado para descrever um estudo de caso, Yin (2001) o retrata como uma investigação empírica que

Enfrenta uma situação tecnicamente única em que haverá muito mais variáveis de interesse do que pontos de dados, e, como resultado, baseia-se em várias fontes de evidências, com os dados precisando convergir em um formato de triângulo, e, como outro resultado, beneficia-se do desenvolvimento prévio de proposições teóricas para conduzir a coleta e a análise de dados (YIN, 2001, p.33).

Desta forma, o estudo de caso como estratégia de pesquisa constitui um método de inteira abrangência, que mantém uma dialética de planejamento com a integração de abordagens específicas à produção e análise dos dados (LÜDKE; ANDRÉ, 1986; MERRIAM, 1998; BOGDAN; BIKLEN, 1999; YIN, 2001).

5.2.1 O desenvolvimento de um estudo de caso

O estudo de caso, a exemplo de outras estratégias de pesquisa, representa um caminho para se investigar um evento empírico seguindo a trilha de um conjunto de procedimentos pré-determinados. Mesmo sistematizado *a priori*, o estudo não segue linhas precisas, de etapas sucessivas e engessadas, seus momentos de investigação se superpõem até resultar na análise das evidências e asserções de valor e conhecimento. A seguir, descrevemos as fases que compõem o desenvolvimento da pesquisa sobre o plano de fundo das premissas do estudo de caso (YIN, 2001). O primeiro estágio configura-se na elaboração de um plano inicial ainda incipiente, que vai se delineando à medida que o estudo se desenvolve.

Projetando o estudo de caso

A primeira fase do estudo é exploratória, na qual os pontos críticos iniciais a serem investigados têm origem, geralmente com o exame da literatura, ou também, de acordo com Lüdke e André (1986), podem ser frutos de observações e depoimentos por especialistas sobre o problema, podem aparecer em contatos iniciais com os sujeitos relacionados ao problema ou, por exemplo, serem derivadas de conjecturas baseadas nas experiências pessoais do pesquisador.

Neste momento, ocorre a tarefa de projeção do estudo de caso, desenvolvendo-se uma lógica de planejamento que conecte os dados a serem produzidos (e as considerações a serem levantadas) às questões iniciais do estudo. Para delinear um estudo de caso, Yin (2001, p.42) aponta a importância da contemplação de cinco componentes: 1. As questões de um estudo; 2. suas proposições, se houver; 3. Sua(s) unidade(s) de análise; 4. a lógica que une os dados às proposições; 5. Os critérios para se interpretar as descobertas.

O primeiro componente, “*as questões de um estudo*”, sugere que a forma das perguntas norteadoras da pesquisa seja em termos de “quem”, “o que”, “onde”, “como” e “por que”, fornecendo assim uma chave importante no estabelecimento da estratégia da investigação. Assim, Yin (2001) afirma que a tarefa inicial é precisar com clareza a natureza das questões do estudo.

Em nossa investigação, conforme descrito e justificado anteriormente no capítulo de introdução, foram formuladas duas perguntas auxiliares e uma pergunta principal para o direcionamento dos objetivos da pesquisa, são elas:

Pergunta Principal: O uso didático de mecanismos externos de mediação, com representações visuais específicas para o objeto quântico, construídas de acordo com suas principais interpretações, promove o estabelecimento do licenciando em Física em uma corrente interpretativa da MQ?

Pergunta Auxiliar I: As representações específicas do objeto quântico, alusivas às quatro principais interpretações da MQ, são capazes de preencher as lacunas interpretativas que ocorrem após o uso de experimentos virtuais?

Pergunta Auxiliar II: Após observar a modelização, realizada sob perspectiva das quatro principais interpretações da MQ, acerca da compreensão conceitual do experimento de dupla fenda, o estudante é capaz de transpor sua interpretação de escolha de forma autônoma e não solicitada para o IMZ?

O segundo componente elencado por Yin (2001) para projetar um estudo de caso é a definição de “*suas proposições (se houver)*”. O autor estabelece que cada proposição se destina a chamar atenção para os elementos que devem ser examinados dentro do escopo do estudo. Ainda de acordo com Yin (2001), alguns estudos não necessitam explicitar proposição alguma, essa condição existe em experimentos, levantamentos e outras estratégias semelhantes de pesquisa nas quais um tópico é o tema da “exploração”, entretanto, cada investigação deve ter uma finalidade, se não a exposição de proposições, o projeto para o estudo deve apresentar um direcionamento e os critérios para o percurso da pesquisa. Essas proposições, transparentes ou implícitas, mostram onde o pesquisador deve procurar evidências relevantes para a solução das perguntas.

Objetivando encontrar respostas para as perguntas de pesquisa desta investigação, direcionamos, portanto, nossas observações para as resoluções e explicações - antes e após instruções didáticas mediadas por mecanismos específicos - dos alunos aos problemas propostos, que circundam os resultados experimentais das diversas configurações para a bancada virtual da dupla fenda e do IMZ.

Sendo assim, estabelecemos as seguintes proposições centrais que nos conduzem na direção certa, além da reflexão de questões teóricas.

- Mecanismos externos de mediação podem influenciar significativamente nas interpretações privadas dos licenciandos em física.
- As articulações das representações mentais e *drivers* dos estudantes podem possibilitar a verificação da modelização científica acerca do comportamento do objeto quântico.
- A linguagem verbal e gestual expressada pelos alunos é uma fonte relevante na identificação de representações mentais e *drivers*.

O terceiro componente trata da “*unidade de análise*”, aborda a ação fundamental de se definir o que é um “caso”. Segundo Yin (2001), um “caso” pode ser um indivíduo. Exemplos dessa natureza são os estudos de pacientes clínicos, de estudantes específicos ou certos tipos de líderes, nesses estudos, a pessoa é o caso que está sendo analisado, logo, o indivíduo se torna a unidade primária de análise. Isso vale para um conjunto determinado de indivíduos, que poderiam ser incluídos em um estudo de múltiplos casos que compõem a investigação. O autor acrescenta que o “caso” também pode ser algum evento ou entidade, “*como tomadas de decisões, programas de vários tipos, sobre o processo de implantação de alguma coisa em alguma empresa ou entidade e sobre mudança organizacional*” (YIN, 2001, p.44).

Como orientação geral, Yin (2001) sugere que a definição da unidade de análise e, portanto, do “caso”, seja amparada e relacionada com as questões iniciais da pesquisa, isto é, os problemas iniciais norteadores do estudo conduzem para o estabelecimento do “caso”. Conseqüentemente, definimos nosso caso como sendo a interpretação conceitual dos licenciandos em fase final do curso de Física acerca do fenômeno da dualidade onda-partícula após uma instrução didática mediada por mecanismos externos específicos. Desta forma, podemos analisar a modelização científica dos estudantes a partir da articulação das imagens mentais e *drivers*, oriundos ou não das mediações empregadas pelo estudo. Também podem ser levantados resultados, lidos sob o enfoque da TMC e da modelização Bungeana, quanto à relevância na modificação conceitual/interpretativa dos alunos, das ferramentas e dos métodos utilizados em sala de aula.

O quarto e o quinto componentes para a estruturação do estudo de caso, “*A lógica que une os dados as proposições*” e “*Os critérios para se interpretar as descobertas*” respectivamente, são menos desenvolvidos no estudo de caso, de acordo com Yin (2001). Uma vez que essas etapas estão relacionadas com a análise dos dados, deve-se haver um planejamento específico de fundamentação e propósito na condução do movimento de leitura dos dados e apontamento de resultados. Em nossa investigação, a análise será realizada a partir

dos dados extraídos dos testes resolvidos pelos alunos e pela linguagem verbal e gestual capturada durante a técnica *Report Aloud*. Ressaltamos que toda a estratégia de análise²⁰ ocorre fundamentada e em harmonia com o referencial teórico-epistemológico adotado.

A seguir, serão abordados aspectos essenciais na condução para o levantamento dos dados em um estudo de caso.

Preparação para a produção de dados

Na seção anterior, foram abordados fatores primários para a realização de um estudo de caso, como a definição inicial das perguntas da pesquisa e a projeção do desenvolvimento do estudo. Aqui, vamos tratar, de acordo com as conjecturas de Yin (2001), elementos da preparação para a produção dos dados.

De acordo com Yin (2001, p.79),

A preparação para realizar um estudo de caso envolve habilidades prévias do pesquisador, treinamento e preparação para o estudo de caso específico, desenvolvimento de um protocolo de estudo de caso e condução de um estudo de caso piloto.

Em nossa investigação, procuramos contemplar todos os elementos mencionados e atribuir energia necessária no empenho da construção de uma base sólida sobre a qual os dados são produzidos e preparados para a análise. Quanto às habilidades desejadas por parte do pesquisador para coletar dados em um estudo de caso, Yin (2001) aponta a capacidade de fazer perguntas pertinentes e interpretar suas respostas, o pesquisador deve ser bom ouvinte e não ser enganado por suas próprias ideologias, deve ser flexível a situações que possam surgir e que não estavam previstas, deve ter a noção clara das questões que estão sendo estudadas, deve ser imparcial em relação a noções preconcebidas, incluindo aquelas que se originam de uma teoria.

Para desenvolver e/ou aprimorar os atributos descritos, buscamos primeiramente leituras acerca de estudos de caso, tanto em outras obras que descrevem teoricamente esse método, como Lüdke e André (1986), Bogdan e Biklen (1999) e Merriam (1998), quanto em pesquisas que fizeram uso dessa estratégia em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo Ponte (1994), direcionado à educação matemática; Meirinhos e Osório (2016), direcionado à educação; Serralta, Nunes e Eizirik (2011), direcionado à psicoterapia; Malgieri, Onorato, De Ambrosis (2017) e Pieper (2019), direcionados ao ensino de física.

²⁰ A descrição completa da estratégia de análise adotada por nossa investigação está apresentada na seção 5.6.

Ao tratarmos da operacionalização, para que ao longo da produção dos dados o pesquisador não interfira de forma equivocada, a técnica *Report Aloud* foi repetida em outros estudos nossos (TREVISAN; SERRANO, 2014; TREVISAN; SERRANO, 2016a; TREVISAN; SERRANO, 2016b; TREVISAN; SERRANO, 2017; TREVISAN; SERRANO, 2018) nos últimos cinco anos, o que proporcionou mais confiabilidade no momento de execução, essa preocupação ocorre pelo fato desta ser a principal fonte de dados e consequentemente identificação de representações mentais e *drivers*.

Desta forma, o protocolo do estudo de caso pôde ser consolidado durante suas aplicações em contextos semelhantes de estudo. Yin (2001) ressalta que o protocolo não se trata apenas de um instrumento, mas também contém os procedimentos e as regras gerais para serem levadas em consideração ao se utilizar os instrumentos. Além do mais, o protocolo é uma das ações principais para se aumentar a confiabilidade da pesquisa de estudo de caso. Informamos o leitor de que as etapas que compõem o experimento²¹ realizado para responder as perguntas centrais da pesquisa, serão detalhadas na seção 5.5.

Ainda em relação à preparação para a produção dos dados, Yin (2001) recomenda a realização de um estudo piloto, estruturado de forma semelhante ao estudo principal. Este estudo primário torna-se um ensaio/preparação experimental e validação de todos os desdobramentos da investigação, ocorrendo uma prévia obtenção e análise de dados que direciona o pesquisador a uma avaliação em relação ao estudo como um todo, e prepara-o teoricamente e metodologicamente para as demais implementações da pesquisa.

Nosso estudo piloto (TREVISAN; SERRANO, 2018) foi realizado em 2017/02 com três licenciandos em Física após terem cursado a disciplina introdutória de MQ em uma instituição de ensino superior privada, que chamaremos de IES A. Esse experimento piloto nos inspirou uma reflexão e autoanálise, promoveu alterações nas implementações dos testes, período de realização das instruções didáticas, alterações nos mecanismos externos de mediação, entre outros ajustes. As modificações ocorridas para os demais experimentos, bem como suas justificativas, serão apresentadas na seção 5.5 juntamente com os resultados levantados e publicados a partir do estudo piloto.

Os pressupostos abordados por Yin (2001) e descritos nesta seção nos amparam na revisão e preparação para a produção dos dados. A seguir, são estabelecidas as conjunturas assumidas para o levantamento e análise de evidências.

²¹ Chamamos de “Experimento” a sequência de etapas desenvolvidas ao longo de toda interação com os sujeitos da pesquisa – os licenciandos em Física.

Produção e análise de evidências

Primeiramente, direcionamos nosso texto para a fundamental questão do levantamento de evidências em um estudo de caso, que segundo Yin (2001), pode acontecer por meio de seis fontes distintas, que requerem habilidades e procedimentos metodológicos sutilmente diferentes. As fontes em questão são: documentos, registros em arquivo, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos.

Além da atenção para as seis fontes que promovem a produção de dados, Yin (2001) menciona princípios que devem ser levados em consideração neste momento, ao se realizar um estudo de caso. Neste ponto inclui-se o uso de:

- a) várias fontes de evidências, ou seja, evidências provenientes de duas ou mais fontes, mas que convergem em relação ao mesmo conjunto de fatos ou descobertas;
- b) um banco de dados para o estudo de caso, isto é, uma reunião formal de evidências distintas a partir do relatório final do estudo de caso;
- c) um encadeamento de evidências, isto é, ligações explícitas entre as questões feitas, os dados coletados e as conclusões a que se chegou (YIN, 2001, p.106).

Assim, a incorporação desses princípios na investigação de um estudo de caso pode aumentar significativamente a sua qualidade em asserções de conhecimento e possíveis generalizações teóricas, pois reforça a validade e confiabilidade do constructo.

Os principais meios imediatos para o levantamento de evidências adotados em nossa investigação são os registros em arquivo e as entrevistas. Os registros em arquivo são compostos por três testes²², resolvidos pelos estudantes ao longo de todo estudo, e também pelos guias de instrução para a realização das atividades com as bancadas virtuais da dupla fenda e do IMZ. As entrevistas, acontecem de acordo com o protocolo *Report Aloud* (TREVISAN et al., 2019), nas quais são tomadas como pauta as respostas dissertadas pelos alunos nos testes realizados.

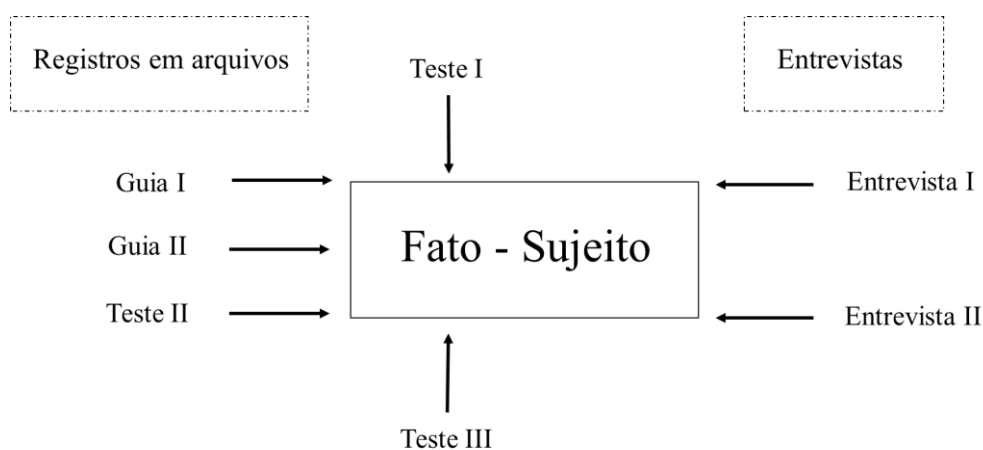
Olhamos tanto para os registros nos testes e guias quanto para as entrevistas (como exposto na Fig. 31) com o intuito de identificar as representações mentais e os *drivers* dos estudantes na compreensão de fenômenos direcionados a dualidade onda-partícula do objeto quântico. Considerando as evidências levantadas por estes meios, é possível estabelecer triangulações, comparando seus constructos em diferentes situações durante o estudo,

²² Os testes elaborados e empregados neste estudo serão abordados em mais detalhes na seção 5.4.

investigando assim as possíveis alterações nas interpretações privadas dos licenciandos em relação aos problemas propostos.

Além do mais, Yin (2001) menciona três princípios que beneficiam e maximizam a produção de dados no estudo de caso, os quais buscamos contemplar nesta investigação. O primeiro princípio é a “*utilização de várias fontes de evidência*” (Fig. 31), como descrito anteriormente, foram utilizados os registros de todos os testes aplicados e dos guias experimentais (construídos de acordo com o P.O.E (*Predict-Observe-Explain*) (TAO; GUNSTONE, 1999)) e o conteúdo verbal e gestual de duas entrevistas realizadas com cada sujeito no decorrer das atividades.

Figura 31 – Convergência das fontes de evidências do estudo.



Fonte: O autor.

O segundo princípio listado por Yin (2001) é a “*criação de um banco de dados para o estudo de caso*”, que tem a ver com a maneira de ordenar e documentar os dados produzidos. Essa organização dos dados permite uma possível análise secundária, independentemente de qualquer proposição realizada pelo pesquisador primário.

Yin (2001) chama a atenção para o frequente equívoco na comparação entre as evidências apresentadas nos relatórios dos estudos com os próprios dados elementares obtidos. Um leitor mais crítico pode ter acesso aos dados levantados ainda em seu estado original para que compreenda e possivelmente confirme a sequência lógica da análise das evidências e asserções de conhecimento descritos no manuscrito da investigação.

Em nosso estudo são disponibilizados todos os instrumentos de produção de dados, desde os testes e guias resolvidos até as transcrições das entrevistas realizadas. Desta forma, o leitor pode sempre que desejar, acessar o banco de dados e analisa-los em seu estado natural.

O terceiro princípio a ser seguido é o de “manter o encadeamento de evidências”. Segundo Yin (2001), esse princípio consiste em permitir a um observador externo o reconhecimento de que as evidências oriundas das questões iniciais do estudo conduzem às formulações dos enunciados finais da investigação. Outrossim, Yin (2001) indica que o observador externo deve conseguir explorar as etapas do estudo em qualquer direção, tanto partindo das perguntas de pesquisa até as considerações finais, quanto iniciando nas conclusões e chegando nas perguntas iniciais.

O autor utiliza uma analogia com as investigações criminais, em que as provas devem ser coletadas por meio de um processo que assegure a sua veracidade, isto quer dizer que as provas apresentadas no “tribunal” – em nosso caso, na tese – sejam legítimas as encontradas na cena do “crime” (pesquisa) no decorrer do processo de produção dos dados.

De acordo com Yin (2001) três são os fatores que podem esclarecer como surgiram as conclusões em um relatório de estudo de caso. Primeiro, o próprio texto deve ter referenciado os pontos relevantes do banco de dados do estudo, como por exemplo, em nosso caso, citando os testes e trechos das entrevistas. Segundo, o banco de dados deve revelar as evidências com indicações das circunstâncias as quais elas foram produzidas. Terceiro, todo o procedimento para o levantamento de evidências deve ser consistente com as conjecturas presentes no protocolo do estudo, a fim de demonstrar que a produção dos dados surgiu com embasamento teórico *a priori*.

Após a abordagem dos direcionamentos que conduzem a produção dos dados, o próximo passo é esclarecer como o processo de análise é orientado em um estudo de caso bem como o estruturamos em nossa investigação. O encadeamento da análise é o segmento de pesquisa em que se busca a recombinação das evidências tendo em vista as proposições iniciais do estudo, é a organização e sobretudo interpretação dos dados para o alcance de significados e respostas às questões centrais da investigação.

Yin (2001) preconiza que cada pesquisador deve iniciar seu estudo com uma estratégia analítica geral, na qual são estabelecidas as prioridades do que será analisado juntamente com seus por quês. Para tanto, Yin (2001) apresenta duas estratégias gerais capazes de serem utilizadas. A primeira, chamada de “*Baseando-se em proposições teóricas*” e a segunda, denominada “*Desenvolvendo uma descrição de caso*”. Estas estratégias gerais abarcam quatro técnicas analíticas, consideradas por Yin (2001) como dominantes, são elas: adequação ao padrão, construção da explanação, análise de séries temporais e modelos lógicos de programa.

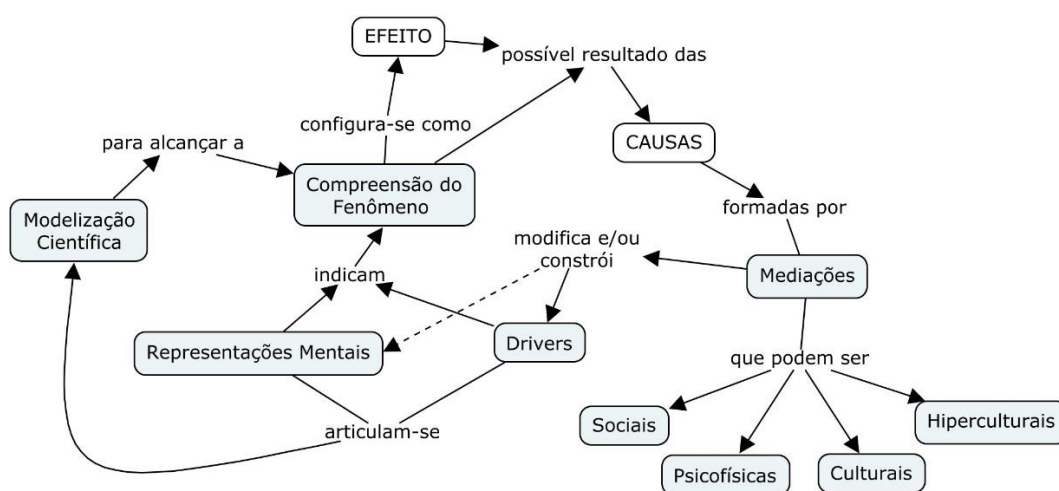
Em nosso planejamento de investigação, inclinamos o movimento de análise sob a estratégia geral “*baseada em proposições teóricas*”, na qual a técnica dominante enquadra-se

nos “*modelos lógicos de programa*”. Nessa estratégia geral adotada, busca-se seguir as proposições teóricas que levaram o planejamento do estudo, refletindo os objetivos e o conjunto de questões da pesquisa. De acordo com Yin (2001), as proposições dão forma ao plano para produção dos dados, conseqüentemente estabelecem prioridade às estratégias analíticas pertinentes.

Assim, nosso estudo apoia-se no propósito de verificar as representações mentais dos licenciandos em física e seu possível vínculo com mecanismos externos de mediação, no momento de pensar a estruturação das evidências e articulação de respostas para as perguntas centrais do estudo. Para tanto, a elaboração desse enlace de evidências inspira-se na técnica de “modelos lógicos de programa” (YIN, 2001), na qual contempla a combinação de traços das técnicas de “adequação ao padrão” e de “análise de séries temporais”.

Nessa estratégia, de acordo com Yin (2001), busca-se um padrão-chave de causa-efeito entre variáveis independentes e dependentes. Contudo, o autor ressalta que a análise estabelece, deliberadamente, “um encadeamento complexo de eventos (-padrão) ao longo do tempo (série temporal), dando conta dessas variáveis independentes e dependentes” (YIN, 2001, p. 149). Na adequação ao nosso contexto de investigação, não definiremos especificamente as variáveis independentes e dependentes, mas as trataremos em cenários ampliados de conhecimento, ou seja, em termos da compreensão do fenômeno estudado (efeito) e mediações (possíveis causas) que auxiliaram a construção conceitual. O mapa conceitual a seguir (Fig.32), sintetiza o plano que norteia a organização das evidências no curso da análise.

Figura 32 – Relação causal no contexto da pesquisa.



Fonte: A pesquisa.

Neste cenário, as representações mentais, os *drivers* e suas articulações são as evidências primárias que, ao serem minuciosamente examinadas, possibilitam o desenvolvimento da análise e suas asserções de valor e conhecimento, buscam responder às

perguntas que deram origem à investigação. No capítulo 6 – Análise dos Dados e Resultados, são descritos com o devido detalhamento o encadeamento da leitura dos dados, inspirada na fundamentação teórica e metodológica que compõem a ideologia deste estudo.

Buscamos, nesta seção, explicar a opção pelo estudo de caso como estratégia de pesquisa, dentro da escolha de um viés qualitativo de investigação, assim sendo, procuramos elucidar os caminhos percorridos em todo o desenvolvimento do estudo. Nas próximas seções deste capítulo, serão descritos os sujeitos participantes da pesquisa, os instrumentos de produção de dados e a técnica *Report Aloud*, um diferencial dessa pesquisa e uma das principais fontes de levantamento de representações mentais e *drivers*.

5.3 OS SUJEITOS PARTICIPANTES DA PESQUISA

Em nosso estudo, tomamos o licenciando em física como foco principal da pesquisa devido ao anseio de analisar na estrutura cognitiva deste professor em formação as representações mentais e os *drivers* acerca da interpretação conceitual para os experimentos virtuais da dupla fenda e do IMZ. Tendo em vista os propósitos desta investigação, os desdobramentos metodológicos centrados nas instruções didáticas foram desenvolvidos ao longo de duas disciplinas introdutórias de MQ nos cursos de Licenciatura em Física de duas instituições de ensino superior (IES), somando um total de 17 estudantes participantes de todas as etapas propostas. Vale ressaltar que os estudantes envolvidos na pesquisa concordaram com o Termo de Autorização de Uso de Imagem, Nome e Voz (anexo A).

Como nosso estudo utiliza métodos qualitativos na produção e análise dos dados, não consta na literatura pesquisada uma menção quanto a um número mínimo ou máximo exigido para a quantidade de sujeitos participantes. No entanto, Backer e Edwards (2012) comentam que a quantidade da amostra depende do objetivo da pesquisa, sendo que os dados obtidos devem contemplar os fins da investigação. Portanto, nesta pesquisa, julgamos a quantidade de sujeitos suficiente, uma vez que emergiram resultados conclusivos utilizados para atender aos objetivos inicialmente estipulados e chegar a ponderações direcionadas ao problema norteador de pesquisa. A tabela 1, a seguir, resume o campo empírico.

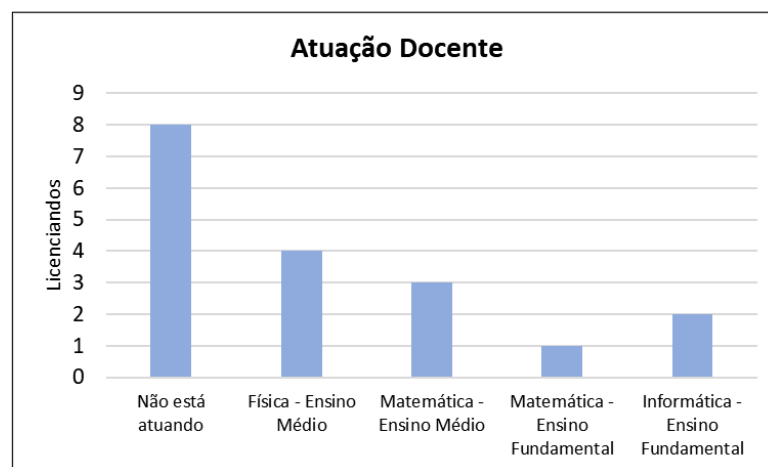
Tabela 1 – Contexto dos licenciandos.

IES	Nome da Disciplina	Número de alunos	Período
IES “A” (Privada)	Mecânica Quântica	8	2018/01
IES “B” (Pública)	Física Moderna e Contemporânea I	9	2018/02

Fonte: A pesquisa.

Em relação ao primeiro contato com as disciplinas, em ambas as IES, os acadêmicos eram calouros no componente curricular, ninguém estava cursando a disciplina pela segunda vez ou mais. Também por integralidade, nenhum aluno mencionou ter cursado uma disciplina anterior que houvesse tratado de maneira formal os conteúdos de MQ elencados nas ementas dos cursos das duas IES. Em relação à vigente atuação docente formal dos licenciandos, a Fig. 33 aponta os números correspondentes.

Figura 33 – Relação de licenciandos que já atuam como docentes.



Fonte: A pesquisa.

A escolha por desenvolver as atividades com os acadêmicos em fase final do curso acontece pelo fato de os pré-requisitos necessários para maior absorção conceitual ao longo das instruções didáticas já terem sido cursados. Isto é, consideramos que conhecimentos historicamente consolidados até meados do final do século XIX, como a teoria eletromagnética e a óptica geométrica e física sejam importantes para estabelecer relações conceituais entre os resultados da dupla fenda e do IMZ em regime clássico e quântico.

As atividades vinculadas ao nosso estudo foram desempenhadas durante o andamento das aulas dos componentes curriculares intitulados “Mecânica Quântica” na IES “A” e “Física Moderna e Contemporânea I” na IES “B”. Essa escolha se deu pelo fato destas disciplinas abordarem conteúdos introdutórios da MQ e também pela disponibilidade de inserção no ambiente da sala de aula proporcionada pelos professores responsáveis dos componentes curriculares em questão. A tabela 2, a seguir, elenca os conteúdos das ementas²³ de ambas as disciplinas.

Tabela 2 – Listagem de conteúdos das disciplinas em que o estudo foi realizado.

<p>IES A - “Mecânica Quântica”. Carga horária: 68h. Presente no 7º período de um total de 7 da grade curricular vigente.</p>	<p>IES B - “Física Moderna e Contemporânea I”. Carga horária: 90h. Presente no 6º período de um total de 8 da grade curricular vigente.</p>
<p><u>Simulação De Experimentos</u>: Experimento de duas fendas. Interferômetro de fóton. <u>Origens Da Mecânica Quântica</u>: Radiação térmica e postulado de Planck; Propriedades corpusculares da radiação; O postulado de de Broglie; O princípio da incerteza; O modelo de Bohr para o átomo. <u>Epistemologia Da Física Quântica</u>: Perfis epistemológicos da Teoria Quântica. Paradoxo do Gato de Schrödinger. Superposição de estados e colapso da função de onda. Medições livres de interação. Princípio de Correspondência e Descoerência. <u>Teoria De Schrödinger</u>: A equação de Schrödinger independente do tempo; Valores esperados e autofunções; A quantização de energia na teoria de Schrödinger; Soluções da equação de Schrödinger independente do tempo; Schrödinger dependente do tempo; Momento angular orbital. <u>Momento Angular Total</u>: Momento de dipolo magnético e spin; A interação spin-órbita; Momento angular total. <u>O Problema Das Medições</u>: Observáveis. Resultados de medições. Relação entre estado de um sistema quântico e resultado de uma e de várias medidas.</p>	<p><u>Teoria da Relatividade Restrita</u>: referenciais inerciais, experimento de Michelson-Morley, relatividade da simultaneidade, transformações de Lorentz, contração das dimensões e dilatação do tempo, composição de velocidades relativísticas, efeito Doppler relativístico, paradoxo dos gêmeos, momento relativístico, energia relativística. <u>Origens da Teoria Quântica</u>: radiação de corpo negro, lei de Wien, lei de Stefan-Boltzmann, quantização da energia de Planck. <u>Interação da radiação com a matéria</u>: propriedades corpusculares da radiação através do estudo do efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares (aplicação na tomografia por emissão de pósitrons), geração de raios x; Modelos atômicos: modelos de Thomson e Rutherford para o átomo, espectros atômicos, modelo atômico de Bohr.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor com informações de livre acesso disponibilizadas pelas IES.

²³ Todos os conteúdos listados foram extraídos dos Projetos Pedagógicos dos Cursos das IES.

O momento em que as atividades foram desenvolvidas no decurso do semestre letivo de cada disciplina e a duração de todas os segmentos do estudo envolvendo os licenciandos em física serão descritos detalhadamente na seção 5.5, na qual serão apresentadas as etapas de todas as interações com os sujeitos participantes da pesquisa, A esse conjunto de etapas, daremos o nome de “Experimento”.

A seguir, discutimos os instrumentos responsáveis pelo levantamento dos dados desta investigação.

5.4 PRODUÇÃO DE DADOS: OS INSTRUMENTOS RESPONSÁVEIS

Para que uma análise fidedigna de dados qualitativos possa ser realizada, Yin (2001) sugere a elaboração do maior número possível de instrumentos para o levantamento e triangulação desses dados. Em vista disso, foram empregados nesta investigação os instrumentos elencados e descritos a seguir.

5.4.1 Teste I

Neste momento, é adequado lembrar que os instrumentos desenvolvidos e utilizados por nosso estudo buscam identificar as representações mentais e *drivers* dos licenciandos em física acerca do tema da dualidade onda-partícula. Inclusive, verificar as possíveis mediações responsáveis pelas construções e/ou modificações destas representações mentais e *drivers*.

O Teste I²⁴ em questão, foi aplicado com a pretensão principal de verificar as concepções iniciais dos acadêmicos a respeito de tópicos fundamentais da MQ direcionados aos resultados dos experimentos virtuais da dupla fenda e do IMZ. A partir das concepções, pode-se identificar as representações mentais e os *drivers* antes de qualquer contato inicial formal dos alunos sobre conceitos básicos de MQ. Além do mais, a sondagem inicial busca reconhecer características dos sujeitos, como já visto na seção 5.3.

O Teste I é composto por 11 questões abertas e 9 questões fechadas. O primeiro bloco de questões buscou a caracterização das amostras, isto é, estabelecer um vínculo com o estudante, as questões estavam interessadas na trajetória acadêmica e profissional na área docente, em especial, na sua proximidade com os conteúdos da MQ. Como por exemplo:

²⁴ O Teste I pode ser encontrado na íntegra no Apêndice A.

1) Você já cursou ou está cursando alguma disciplina que envolva conteúdos da Teoria Quântica? Em caso positivo, qual?

1.3) Atualmente você está lecionando? Em caso positivo, escreva quais disciplinas e nível de ensino.

O segundo bloco, composto pelas questões de número 2, 3, 4 e 5, procurou investigar as concepções dos acadêmicos em relação a fenômenos e entidades quânticas fundamentais. Foram realizadas perguntas nas quais se exigia uma explicação para a diferenciação de um elétron para um grão de areia, explicação para o fenômeno de interferência e definições para a caracterização do elétron e do fóton. Essas duas questões direcionadas aos objetos quânticos são:

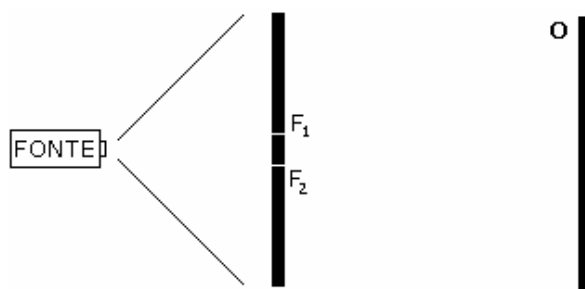
4) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um elétron. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

5) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um fóton. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

Essas perguntas foram inseridas com a intenção de abordar os aspectos gerais do objeto quântico, e de extrair do aluno as suas interpretações frente ao que ele considera um objeto microscópico, e explicar a sua visão do elétron e do fóton. A expectativa é de que os alunos utilizem um “posicionamento” intuitivo, utilizando possivelmente a palavra “partícula” e/ou mencionando a “luz” em suas explicações.

O terceiro bloco, composto pelas questões de número 6 até a de número 15, é orientado à sondagem de conhecimentos acerca dos resultados e das interpretações dos arranjos experimentais da dupla fenda e do IMZ. Essas questões abertas e de múltipla escolha foram extraídas e baseadas nos trabalhos de Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009), McKagan, Perkins e Wieman (2010) e Trevisan (2016). Através das respostas dos alunos, pode-se obter um panorama prévio em relação aos conceitos básicos da dualidade intrínsecos em cada um. A cargo de exemplo, seguem as questões 6 e 10:

6) 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, F1 e F2, antes de ser projetado num anteparo O, constituído de uma tela fosforescente.



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

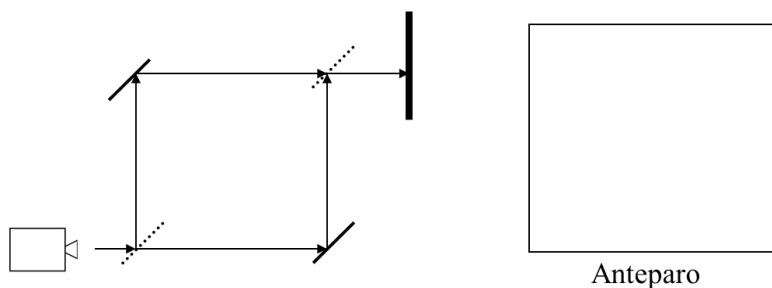
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

10) No esquema simplificado abaixo se encontra um espelho semirrefletor que divide um feixe de fótons emitido pela fonte em dois. Após outro conjunto de espelhos, os feixes são novamente unidos. O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



Após as questões específicas dos arranjos experimentais, podemos considerar um quarto bloco composto por duas perguntas em que há uma retomada na definição dos objetos quânticos, tanto para o fóton quanto para o elétron, mas com uma ênfase direcionada aos seus comportamentos, as questões são as seguintes:

16) Na sua opinião, o fóton possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

17) Na sua opinião, o elétron possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

Com essas duas questões, podemos obter um primeiro direcionamento dos licenciandos quanto à interpretação do comportamento do objeto quântico após a previsão e explicação de resultados dos experimentos, ainda sem uma bagagem conceitual formal a respeito de todos os assuntos tratados pelas questões. Além do mais, as respostas dessas duas questões podem ser comparadas com as respostas das questões iniciais que remetem a uma caracterização geral do elétron e do fóton.

Por fim, a última questão do Teste I averigua se os acadêmicos possuem conhecimento sobre a existência das interpretações da MQ. Ao final das questões é solicitado um e-mail e telefone pessoal do estudante, para que assim ele possa ser contatado durante as etapas da pesquisa. Ressaltamos que todos os testes foram resolvidos individualmente pelos discentes.

5.4.2 Guia de Atividades

Em nossa investigação, foram utilizadas duas bancadas virtuais como mediação hipercultural para o estudo de tópicos fundamentais da MQ, direcionados ao fenômeno da dualidade onda-partícula. Para orientar a interação dos licenciandos com os *softwares*, foram elaborados dois “Guias de Atividades”, um para cada experimento virtual. Estes guias configuram um roteiro a ser seguido na exploração dos recursos e arranjos experimentais fornecidos pelas simulações.

A metodologia para elaboração dos guias segue o método P.O.E. (TAO; GUNSTONE, 1999), cujo significado é predizer-observar-explicar. Nesse encadeamento, os estudantes são chamados a predizer o comportamento de uma situação-problema ou de um experimento,

observar a simulação e, após essas etapas, explicar possíveis diferenças entre suas concepções e o observado. Acreditamos que esse processo estimula os estudantes a refletir sobre as situações que estão prestes a serem simuladas. Em seguida, possibilita uma segunda reflexão, que pode ou não conflitar com as suas concepções estabelecidas *a priori* do *feedback*, em termos de resultado, proporcionado pelos *softwares*.

O conteúdo e a sequência lógica das atividades presentes nos guias são inspirados nos resultados dos trabalhos de Pessoa Jr (1997), Montenegro e Pessoa Jr (2002), Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009), Singh e Marshman (2015), Baily e Finkelstein (2015) e Trevisan (2016). Em ambos os guias, as situações em cada etapa contemplam uma abordagem essencialmente conceitual, sem a necessidade do emprego de algoritmos matemáticos. Outro fator levado em consideração na elaboração dos guias foi o tempo necessário para execução das tarefas. De acordo com o planejamento do estudo e adequação a inserção nas disciplinas, o tempo disponível para realização da atividade com as bancadas virtuais era de 6 horas-aulas.

A seguir, são apresentados os dois guias utilizados durante a etapa do estudo em que ocorre a mediação hipercultural sob a forma de bancadas virtuais.

Guia de Atividades I – O experimento virtual da Dupla Fenda.

Chamamos de “Guia de Atividades I”²⁵ o roteiro que orienta os licenciandos em física nas interações com o *software* que reproduz o experimento da Dupla Fenda. Esse guia é composto por três blocos de ações, cada bloco relacionado com uma forma de operação da fonte.

O bloco inicial estabelece a fonte em regime clássico, com a emissão de objetos macroscópicos. No primeiro momento, o guia orienta o aluno a preparar o arranjo experimental, isto é, configurar a fonte e a existência das duas fendas, bem como possíveis alterações no espaçamento entre as fendas e a variação de suas larguras. Na sequência, segue-se o método do P.O.E., o acadêmico é levado a prever o padrão que formará no anteparo, de acordo com os aspectos do arranjo experimental construído no *software*. Um exemplo da sequência P.O.E. pode ser observado no recorte abaixo

- Inicialmente, selecione *source* e, em seguida, *gunballs*, na janela que irá aparecer. Em seguida, na janela *aperture*, que determina a abertura e a distância entre as fendas, clique em

²⁵ O “Guia de Atividades I” pode ser encontrado na íntegra no Apêndice B.

slit 1, e você visualizará apenas uma fenda (a fenda 2). Assim, você estará se preparando para simular o que acontece quando apenas balas (ou areias) passam por uma fenda.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que acontece na tela, quando retirada a fenda direita (*slit 1*).



Padrão formado

(OBSERVAÇÃO) Então, clique no botão Θ , que se encontra abaixo da arma, para iniciar a saída das bolas. Em seguida, abra a janela *screen* e clique em *evaluation*. À medida em que se preenchem os pontos na tela o número de pontos em cada posição, é mostrado no gráfico *evaluation*, representando a contagem acumulada. Não esqueça que *speed* lhe fornecerá resultados mais rápidos. Desenhe abaixo o que você observou.



Gráfico (Evaluation)

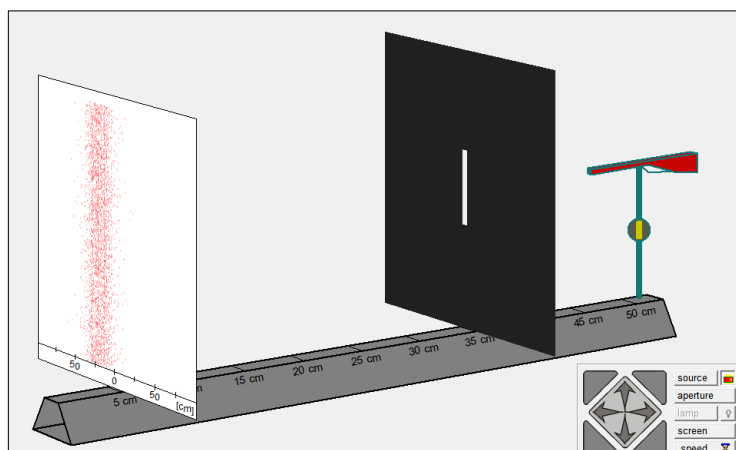


Padrão formado

(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou (apenas para o padrão formado). Existem diferenças? Explique.

Na situação descrita acima, a configuração experimental fica semelhante a ilustrada na figura 34. A resposta no anteparo, para este ajuste é o de um padrão basicamente retangular concentrado em frente a fenda existente.

Figura 34 – Configuração experimental com apenas uma fenda e a fonte emitindo projéteis macroscópicos



Fonte: Extraída do *software* Doppelspat.

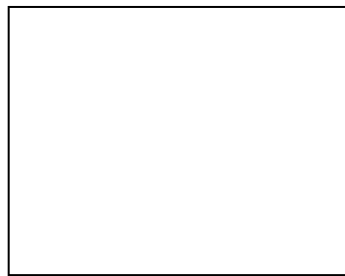
Ainda neste bloco inicial, com a fonte emitindo objetos macroscópicos, são explorados os casos em que somente a fenda 1 está ativada e o caso em que as duas fendas estão presentes. Com as duas fendas ativadas e a fonte permanecendo no regime clássico, não há ocorrência do padrão de interferência, como já observamos no capítulo 4.

O segundo bloco que compõe o guia recomenda a alteração do regime de operação da fonte para a emissão de elétrons individuais. Neste momento, o arranjo experimental passa a ser direcionado ao ramo da MQ. Dessa forma, possibilita-se que os acadêmicos explorem a emissão de elétrons individuais diante da presença de uma e de duas fendas, atentando para a previsão e observação dos resultados no anteparo de observação, tanto para o padrão formado quanto para o gráfico de distribuição dos elétrons. O recorte a seguir, exemplifica mais uma vez a estruturação do guia.

2.1 Deixe a lâmpada apagada e retire a fenda esquerda. Na janela *aperture* altere para 226 nm a abertura da fenda e 1278 nm a distância entre elas. Na janela *source*, altere a energia para 14 KeV. Em seguida, na janela *aperture* que determina a abertura e a distância entre as fendas, clique em *slit 1* e você visualizará apenas uma fenda (a fenda 2). Assim, você estará se preparando para simular o que acontece quando elétrons passam por uma fenda. **(PREVISÃO)** Desenhe abaixo o que acontece na tela, quando retirada a fenda esquerda (*slit 1*).



Gráfico (Evaluation)

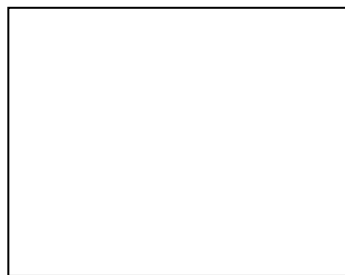


Padrão formado

(OBSERVAÇÃO) Então, clique no botão Θ que se encontra abaixo da fonte, para iniciar a saída dos elétrons. Em seguida, abra a janela *screen* e clique em *evaluation*. A medida em que se preenchem os pontos na tela o número de pontos em cada posição é mostrado no gráfico *evaluation*, representando a contagem acumulada. Não esqueça que *speed* lhe fornecerá resultados mais rápidos. Desenhe abaixo o que você observou. **(Utilize o zoom de 1.000x)**



Gráfico (Evaluation)



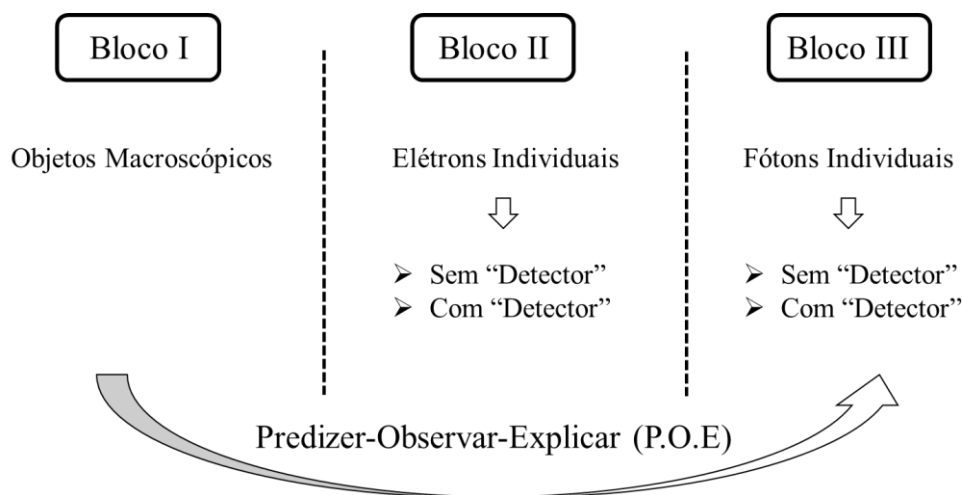
Padrão formado

(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Existem diferenças? Explique.

Ainda neste bloco dedicado à exploração das possibilidades experimentais com a fonte emitindo elétrons individuais, foi utilizada a lâmpada presente no delineamento do arranjo. Logo, é solicitado que o licenciando “ligue” a lâmpada antes da fonte iniciar sua operação. Assim, o ato da lâmpada iluminar o percurso do aparato experimental configura a existência de um detector durante a performance do elétron.

Por fim, o terceiro bloco na composição do guia, somente sugere a alteração da emissão de elétrons individuais para fótons individuais, os demais procedimentos são mantidos, como a ativação ou não da lâmpada e a configuração das fendas. O esquema (Fig. 35) a seguir, resume a organização do Guia de Atividades I.

Figura 35 – Síntese da estrutura do Guia de Atividades I.



Fonte: A pesquisa.

A elaboração do Guia de Atividades II²⁶, acompanha um padrão semelhante de composição. O mesmo será comentado em seguida.

Guia de Atividades II – O Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Conforme mencionado anteriormente, o guia de orientação para a interação com o IMZ segue o esboço utilizado no estudo com o arranjo experimental virtual da dupla fenda. Portanto, o primeiro bloco de atividades inclina-se à exploração da fonte operando em regime clássico, que neste caso é caracterizado pela emissão de um feixe de luz monocromático. Nesse segmento, são manipuladas situações com e sem a presença de detectores. O fragmento a seguir exemplifica uma das ações presentes no Guia II.

1.1 Inicialmente, vamos observar o comportamento de um feixe de luz proveniente de um laser, para isso, selecione **LASER**. Em seguida, clique em **detector 1**. Este detector permite saber se o feixe de luz laser passou por uma parte da trajetória. Ao detectar a luz, ele impede a passagem da mesma. Dessa forma, o feixe só passa pelo outro lado.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca, antes de ligar o dispositivo:



²⁶ O “Guia de Atividades II” pode ser encontrado na íntegra no Apêndice C.

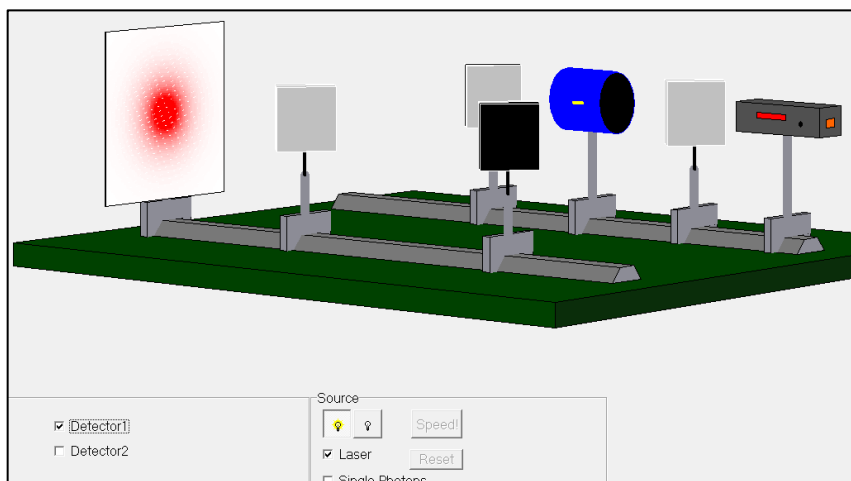
(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento do laser, clique na lâmpada.
Desenhe abaixo o que você observou.



(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver:

A figura 36 ilustra o arranjo experimental observado pelos estudantes ao executarem os procedimentos sugeridos pelo guia.

Figura 36 – Configuração experimental para a fonte emitindo laser e a presença de um detector que impede a passagem do feixe.



Fonte: Extraído do *software* Quantum Eraser.

O segundo bloco de atividades concentra-se nos desdobramentos do arranjo experimental para quando a fonte opera em regime monofotônico, isto é, a fonte emite fótons individuais, um segundo fóton só é emitido após o anterior já ter colidido com o anteparo. Neste cenário, os fenômenos passam a ser quânticos.

Para esta configuração quântica, também foram observadas circunstâncias em que havia ou não a presença dos detectores. Consequentemente, os licenciandos são encaminhados a

prever e analisar os padrões formados no anteparo, bem como os possíveis fatores que determinam os resultados simulados. A atividade abaixo traz um exemplo para o estudo do regime quântico no IMZ.

2.1 A lâmpada agora é uma fonte de fótons individuais. Ela só permite a passagem de um fóton por vez. Agora, acrescente o *detector 1*. Note que agora o detector pode contar quantos fótons passaram por ele. Lembre-se que ele, ao detectar os fótons, bloqueia a passagem deles. Também é contado, para comparação, quantos fótons saíram do emissor. Assim, você pode descobrir por onde cada fóton individual passou! Inicialmente, esta contagem é zero para cada marcador.

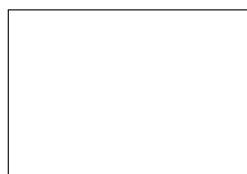
(PREVISÃO) O que acontecerá ao ligarmos o emissor de fótons? Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca. Diga também, ao lado, qual a percentagem de fótons que você espera medir no detector 1, em relação ao número total de fótons emitidos pela fonte:



R. _____

(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento dos fótons, clicando na lâmpada. Quantos fótons saem do emissor e chegam ao detector 1, em termos percentuais?

A opção **speed** (no programa) permite uma visualização mais rápida e você poderá clicar quantas vezes achar necessário. Assim, você faz o tempo passar bem rápido! Desenhe abaixo o que você observou na tela branca após clicar algumas vezes em **speed**.

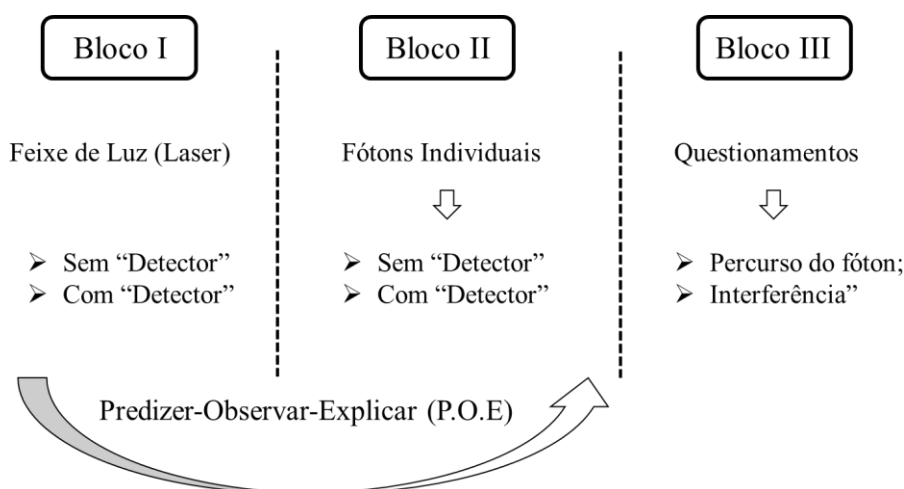


R. _____

(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver, tanto para o desenho como para a porcentagem.

Por fim, o Guia II levanta quatro questionamentos acerca do comportamento do fóton, como por exemplo a solicitação para descrever o percurso do fóton no interferômetro e a explicação do motivo da ocorrência da interferência do objeto quântico em um dos arranjos experimentais. O esquema (Fig.37) a seguir resume a organização do Guia de Atividades I.

Figura 37 – Síntese da estrutura do Guia de Atividades I.



Fonte: A pesquisa.

Na sequência, serão apresentadas e comentadas as questões presentes no Teste II²⁷, respondido pelos acadêmicos na aula seguinte as atividades mediadas pelos *softwares* computacionais.

5.4.3 Teste II

O Teste II²⁸, entregue aos licenciandos para resolução, na primeira aula após a interação com as bancadas virtuais, tem como propósito verificar as possíveis alterações nas concepções dos estudantes acerca do fenômeno da dualidade onda-partícula. O contato com os experimentos virtuais proporciona a observação e a necessidade de interpretação dos resultados levantados ao longo dos exercícios indicados pelos guias.

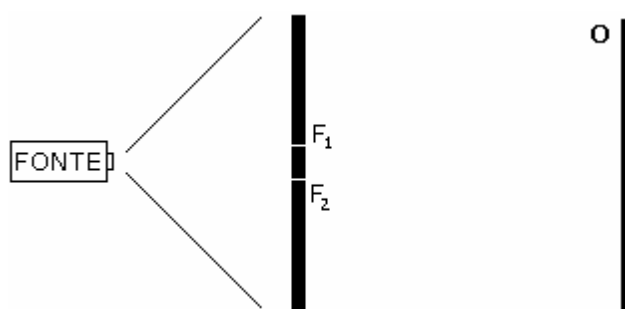
Em virtude do objetivo de analisar, nesta fase, as representações mentais e *drivers* que podem ter sido construídas e/ou modificadas devido à mediação hipercultural, o Teste II segue a mesma linha de questionamentos do Teste I, adotando perguntas que abordem a dupla fenda e o IMZ nos regimes clássicos e quânticos, com ou sem a presença de detectores.

O diferencial das questões presentes no Teste II é um segundo segmento acoplado a determinadas perguntas, que solicita ao aluno ilustrar o comportamento do objeto quântico ao longo do *setup* experimental. Em outras palavras, as questões direcionadas aos arranjos da dupla fenda e do IMZ não estão interessadas apenas na resposta do anteparo e na explicação para tal,

²⁷ O “Guia de Atividades I” pode ser encontrado na íntegra no Apêndice D.

mas também na ilustração do aluno em forma de desenho para caracterizar ao máximo as representações mentais e *drivers* dos licenciandos. A questão abaixo, elucida este formato de averiguação conceitual.

1 - 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 atravessa o primeiro anteparo contendo as 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 elas, é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz incidente e muito menor que a distância entre as fendas e o anteparo.

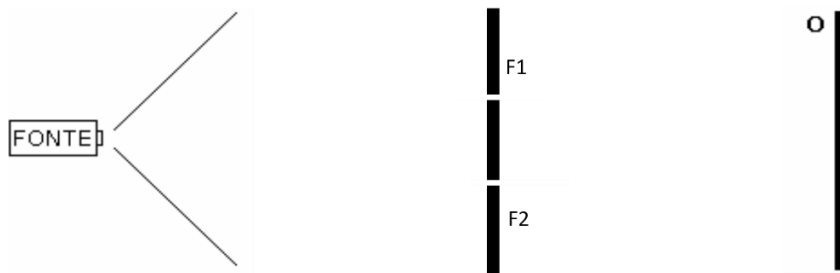
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

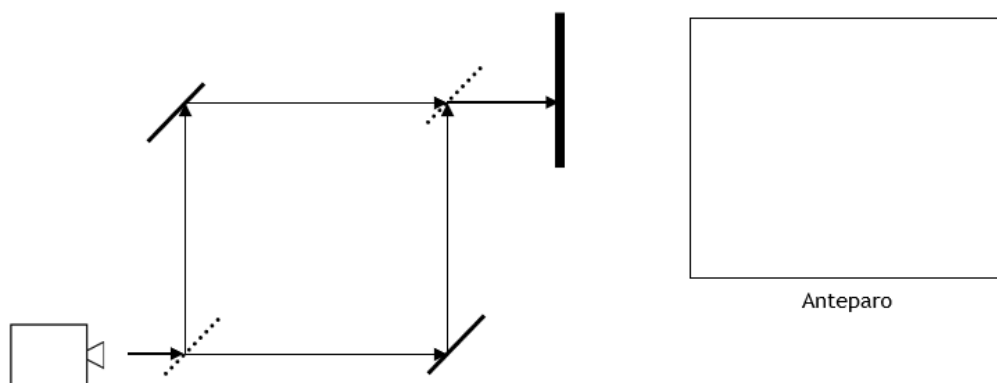
1.1 Desenhe no esquema abaixo a trajetória do feixe de luz, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



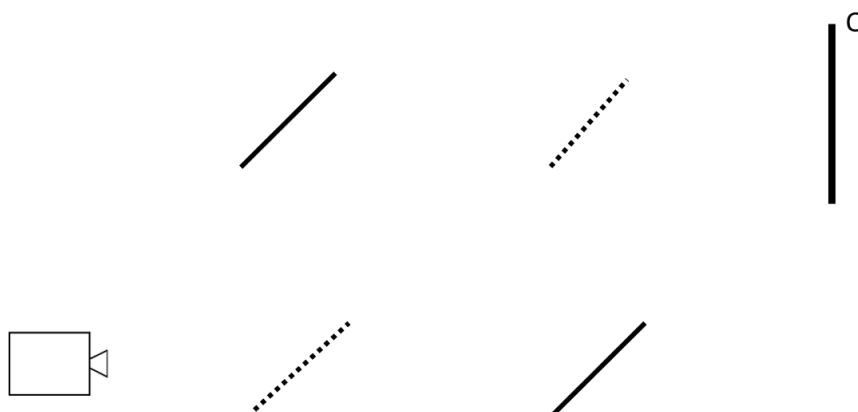
Como podemos ver, a questão inicialmente indaga sobre o padrão a ser formado no anteparo, de acordo com o arranjo experimental indicado. Na sequência busca-se uma explicação dissertativa do aluno para justificar o resultado obtido. E por fim, uma representação para o comportamento/trajetória do objeto quântico pelo *setup* experimental, desde a emissão pela fonte até a chegada no anteparo O.

O mesmo modelo de questão é utilizado para explorar as configurações experimentais do IMZ. O recorte abaixo traz um exemplo para tal composição.

5 - Levando em consideração o mesmo esquema simplificado. O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



Desenhe no esquema abaixo a trajetória do fóton, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



Desta forma, o licenciando é conduzido a expressar com o máximo de detalhes possíveis as representações mentais e *drivers* utilizados na construção da sua interpretação, para que além de expressar o resultado, explique a maneira como imaginou o desdobramento do fenômeno no aparato experimental, sendo este, de fato uma das preocupações principais da investigação.

E a exemplo do Teste I, o Teste II é finalizado com uma questão para o fóton e outra para o elétron, na qual pergunta o comportamento dos objetos quânticos indica que o licenciando defenda sua resposta, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica.

Na sequência, comentaremos sobre o objetivo e a estruturação do Teste III²⁹.

5.4.4 Teste III

O Teste III foi planejado para ser resolvido pelos licenciandos na aula seguinte ao término das instruções didáticas mediadas fundamentalmente pelos *storyboards*. O principal objetivo deste instrumento é verificar a possível evolução conceitual/interpretativa dos licenciandos. Com a investigação das representações mentais e *drivers* externalizados nas respostas, é também possível aferir as contribuições da mediação composta basicamente pelos *storyboards* durante as ações pedagógicas.

É na resolução do Teste III que os estudantes podem estabelecer interpretações mais consistentes, devido à carga conceitual adquirida pela interação com as bancadas virtuais e *storyboards*. Neste momento, as concepções construídas antes do início das atividades do estudo podem ser reforçadas e/ou modificadas.

²⁹ O “Teste III” pode ser encontrado na íntegra no Apêndice E.

Para tanto, este teste é composto praticamente pelas mesmas questões presentes no Teste II. Somente duas questões inseridas no Teste III não estavam presentes no teste anterior. Uma delas aborda as interpretações da MQ, como podemos ver a seguir

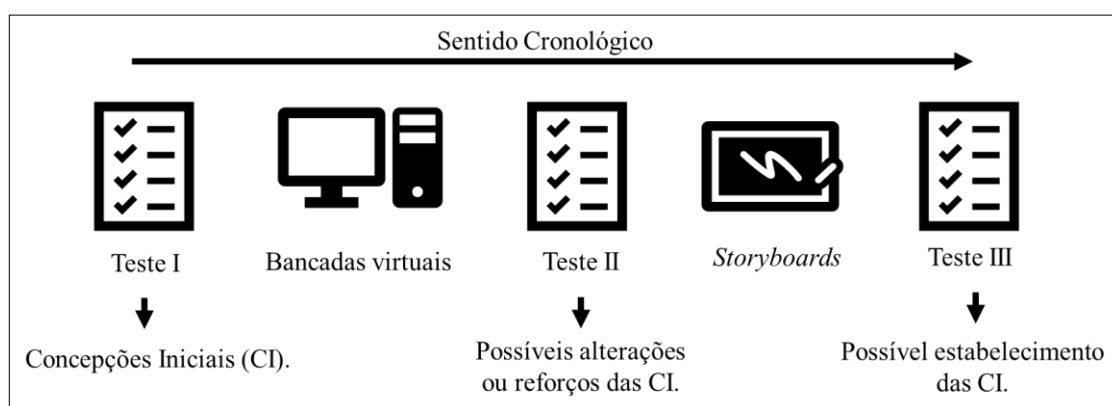
12 - Na sua opinião, o raciocínio/conjunto de ideias que você utilizou para resolver e compreender os problemas propostos pelo aparato experimental da Dupla Fenda e do Interferômetro de Mach-Zehnder, está mais próximo a qual interpretação da Mecânica Quântica? Considerando as quatro principais que foram estudadas: Corpuscular (Realista), Ondulatória (Realista), Dualista (Realista), Dualista (Positivista). Justifique sua resposta.

Nesta questão, buscamos verificar qual é, na concepção do próprio aluno, a interpretação que proporcionou maior influência conceitual no momento de resolução de todo Teste III. Desta forma, podemos analisar se o estudante se baseou em um perfil interpretativo para a resolução dos testes, ou se a partir das suas respostas, o licenciando busca as enquadrar em uma corrente interpretativa mais próxima, e só então indicando-a na questão.

Os três testes elaborados e aplicados em momentos distintos ao longo do estudo fornecem recursos para uma triangulação de dados que levantem evidências a respeito das possíveis modificações das interpretações dos licenciandos em fase final do curso de física acerca do tema da dualidade onda-partícula, explorado nas atividades desempenhadas ao longo da investigação. Além do mais, pode-se verificar os agentes responsáveis pelas possíveis modificações das representações mentais e *drivers*, ou seja, quais mecanismos de mediação influenciaram na construção conceitual expressada.

O esquema abaixo (Fig. 38) recapitula os momentos em que os testes são empregados e as perspectivas gerais para o instrumento.

Figura 38 – Síntese do emprego dos Testes.



Fonte: A pesquisa.

Finalizada a explanação acerca dos testes enquanto instrumentos para produção de dados, na próxima seção descreveremos a técnica adotada para a realização das entrevistas individuais, sendo este o principal meio para a identificação das representações e *drivers* dos licenciandos.

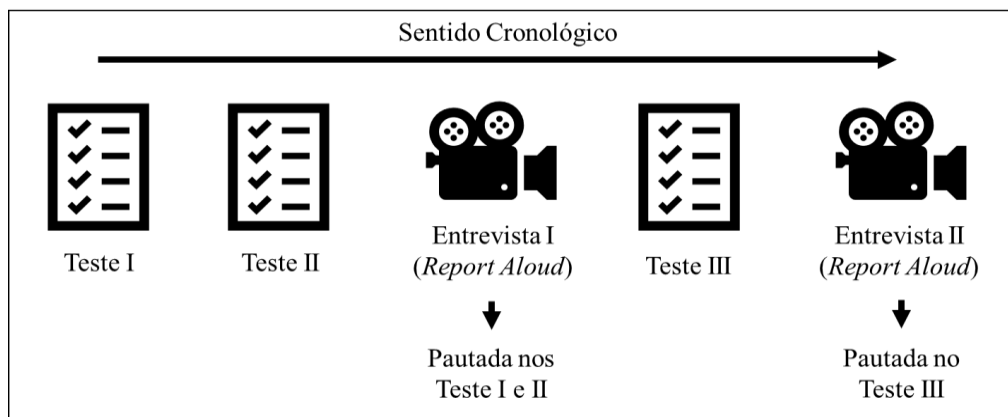
5.4.5 Entrevistas

Em nosso estudo, a entrevista é um importante instrumento de produção de dados, é a principal fonte de identificação das representações mentais e *drivers* dos estudantes. Dentro do planejamento da investigação e desdobramento das atividades que constituem o experimento, foram implementados dois momentos para a realização de entrevistas. O primeiro momento de entrevistas acontece após a resolução do Teste II. O segundo momento ocorre ao final das atividades, após os licenciandos terem resolvido o Teste III.

As duas entrevistas foram realizadas individualmente com os alunos, tendo como pauta as questões e as respostas dos testes resolvidos. O objetivo principal é testemunhar a explicação do acadêmico para as suas resoluções das questões. Assim, é possível verificar quais processos de pensamento foram desencadeados na resolução do problema apresentado. As entrevistas foram conduzidas por uma adaptação da técnica “*Think Aloud*” (VAN-SOMEREN; BARNARD e SANDBERG, 1994), o protocolo “*Report Aloud*” (TREVISAN et al., 2019), que será descrito em maiores detalhes na próxima seção.

O esboço a seguir (Fig.39) indica os momentos em que as entrevistas aconteceram.

Figura 39 - Síntese do emprego dos Entrevistas.



Fonte: A pesquisa.

As entrevistas foram gravadas e transcritas, tal como os áudios produzidos pelos alunos (*sic*), para a devida análise. Na sequência apresentamos a técnica *Report Aloud* (TREVISAN et

al., 2019), um dos diferenciais de nossa investigação no âmbito da pesquisa em Ensino de Ciências.

5.4.6 Consultando as representações mentais dos estudantes: a técnica *Report Aloud* na condução das entrevistas.

Em diversos contextos de investigação em ensino de Ciências, a interlocução com os alunos faz parte do processo metodológico para a produção de dados e indicativos que conduzam a respostas para as inquietações iniciais da pesquisa. Nos momentos de entrevistas, semiestruturadas ou não, o pesquisador e o sujeito participante dialogam abertamente, momento em que o pesquisador busca obter maior quantidade de informações acerca da opinião/postura do sujeito em relação a um determinado tema de pretensão a ser investigado.

Com o objetivo de extrair o máximo possível de informações acerca dos processos cognitivos desempenhados pelos estudantes, quando incentivados a expressar-se sobre determinados conteúdos de conhecimento, utilizamos como método o *Report Aloud* (TREVISAN et al., 2019) para a condução de entrevistas semiestruturadas.

O protocolo *Report Aloud* é uma adaptação da técnica “*Think Aloud*” (VAN-SOMEREN; BARNARD e SANDBERG, 1994). A diferença entre os métodos é que no “*Think Aloud*” o entrevistador e o entrevistado mantêm constante diálogo a respeito do que o entrevistado está pensando durante a execução de uma tarefa, ou seja, enquanto o estudante responde o questionário, ele pensa em voz alta. Já no “*Report Aloud*”, o estudante reporta ao entrevistador o seu processo de pensamento enquanto estava respondendo as questões, ou seja, o estudante resolve as questões e só depois, ao finalizá-las, reporta o seu processo de pensamento.

A opção por adaptar o protocolo original “*Think Aloud*” foi tomada levando em consideração as principais vantagens e desvantagens em cada método. Julgamos que a principal vantagem da técnica original é a de que os estudantes resolvem as questões e, ao mesmo tempo, explicam o seu raciocínio ao entrevistador – sendo este processo capaz de revelar integralmente qual é o processo de raciocínio do estudante em tempo real, a desvantagem é de que, dessa maneira, a própria técnica provoca uma alteração no processo, visto que o aluno possa sentir-se pressionado a responder de forma rápida e correta com a presença de outra pessoa que o observa ao longo das resoluções.

Por sua vez, a técnica *report aloud* tem como ponto negativo o fato de o entrevistador não saber, com total certeza, se os passos reportados (ou recordados) pelos estudantes foram

efetivamente os mesmos utilizados para a resolução do problema (que, em geral, ocorre algum tempo antes da entrevista); contudo, o processo de resolução dos problemas propostos não é perturbado pela técnica e ocorre mais naturalmente, em condições semelhantes a quando o estudante resolve um problema por conta própria. Analisando trabalhos de Ramos (2015), Wolff (2015) e Trevisan (2016), que fizeram uso do *report aloud*, viu-se que, mesmo após alguns dias de diferença entre a resolução dos problemas e a realização da entrevista, ao se deparar com as suas respostas, o estudante é capaz de se lembrar dos detalhes mais importantes que o conduziram às respostas, reportando-os ao entrevistador com grande grau de confiança que o que está reportando foi o que de fato aconteceu durante a resolução do problema.

Neste momento, o entrevistador busca extrair todos os caminhos utilizados pelo sujeito para a construção de sua resposta/opinião, pretendendo desta forma, através do discurso verbal e gestual identificar as imagens mentais dos estudantes ao longo de seu processo de raciocínio e externalização de ideias. Conforme os estudos da psicologia cognitiva contemporânea, os indivíduos não se apropriam de forma direta do ambiente exterior, eles criam representações mentais, maneiras próprias de representar internamente o mundo exterior (MOREIRA, 1996). Dessa maneira, uma representação, tanto interna quanto externa, é qualquer notação, signo ou conjunto de símbolos que represente algum aspecto do mundo externo ou da imaginação (EISENCK; KEANE, 1994). A existência das imagens mentais não é negada pelos pesquisadores e, embora diversas vezes tenham sido negligenciadas por psicólogos cognitivistas, elas aparentemente desempenham um papel fundamental para o desenvolvimento científico (ANDERSON, 1978).

Nesta proposta metodológica, objetivamos a identificação de imagens mentais utilizadas pelos estudantes para responder os questionamentos, antes e/ou após a instrução mediada pelos *softwares* e *storyboards*, de natureza, social, cultural e hipercultural. Portanto, consideramos que tais imagens são expressadas a partir do acesso à informação visual armazenada na memória do estudante. Para tanto, assumimos a concepção acerca de imagens mentais apresentada por Otero (2004), na qual estima as imagens como representações analógicas com semelhança estrutural com o que elas representam, e não meras experiências subjetivas. Essas imagens podem ser geradas pela visualização de algum objeto ou situação, mesmo que brevemente, ou, na maior parte dos casos, as imagens são geradas com base em um conjunto de informações armazenadas na memória.

Toda a entrevista/diálogo conduzido pelo protocolo *Report Aloud* é gravada em áudio e vídeo para que a devida transcrição seja realizada juntamente com a identificação de possíveis gestos descritivos realizados pelos estudantes ao longo de suas explicações. Os gestos

observados servirão como indicadores tanto para a Análise Gestual Monaghan e Clement (1999), e Clement e Stephens (2010) quanto para a análise textual, inspirada em Moraes e Galiazzi (2007). Essas metodologias de análise serão apresentadas em maiores detalhes a seguir.

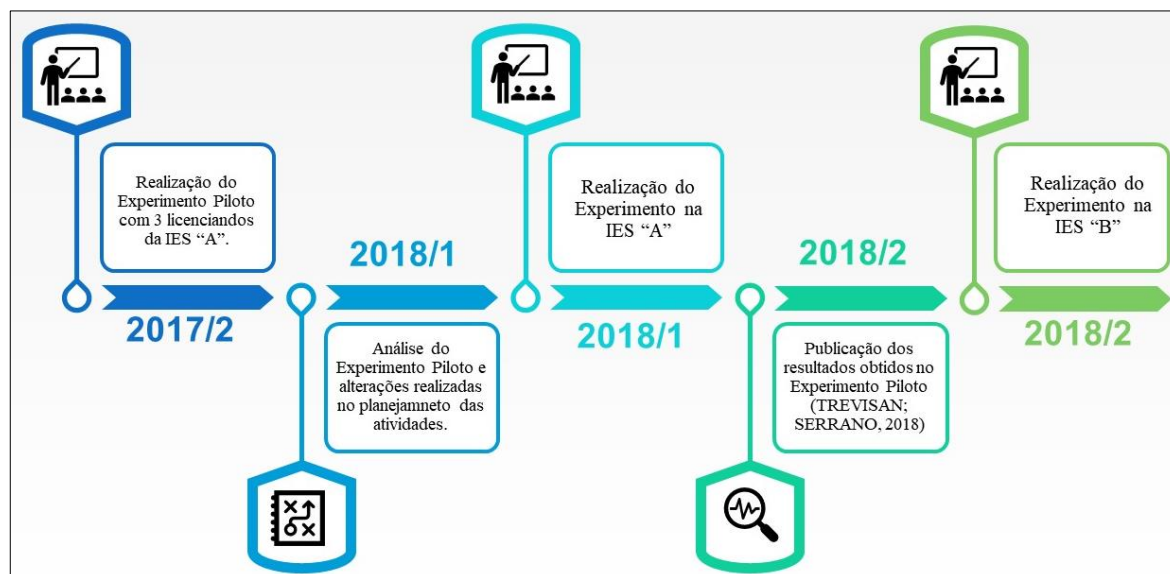
5.5 O EXPERIMENTO: A ESTRUTURAÇÃO DA NUANCE INVESTIGATIVA

Após reconhecer os sujeitos participantes da pesquisa e os instrumentos para a produção dos dados, direcionamos nosso texto para a descrição e justificativa das atividades desempenhadas com os licenciandos em física, as quais chamamos de Experimento. Para tanto, primeiramente, recordaremos o problema de pesquisa norteador desta investigação, que propõe analisar se o uso didático de mecanismos externos de mediação, com representações visuais específicas para o objeto quântico, construídas de acordo com suas principais interpretações, promove o estabelecimento do licenciando em Física em uma corrente interpretativa da MQ.

Logo, procuramos elaborar atividades que envolvessem a manipulação dos estudantes em dois *softwares* juntamente com interações didáticas mediadas por *storyboards* que simulam e abordam o comportamento dos objetos clássicos e quânticos e determinados contextos experimentais. Nesse sentido, o desafio passa a ser o de extrair e identificar por meio de uma metodologia de análise consistente na área de Ensino de Ciências, as representações mentais e os *drives* construídos e/ou modificados dos estudantes após as instruções didáticas.

Antes do desenvolvimento do Experimento nas duas IES já mencionadas, foi realizado um Experimento Piloto com o propósito de uma avaliação das atividades planejadas e construídas. Este evento piloto, com três licenciandos já aprovados na disciplina introdutória de MQ, serviu como base na validação e fornecimento de subsídios suficientes para adequações dos procedimentos, recursos e conceitos previamente engendrados. A linha do tempo abaixo (Fig. 40), exhibe a ordem dos Experimentos executados.

Figura 40 – Ordem cronológica das ações e experimentos realizados.



Fonte: A pesquisa.

Os dados obtidos com o experimento piloto (TREVISAN; SERRANO, 2018) nos mostraram que os dois estudantes selecionados para análise apresentaram uma postura realista clássica ao longo de suas explicações para os resultados da dupla fenda e do IMZ em regime quântico. Os resultados previstos pelos alunos geralmente eram considerados certos e confirmados experimentalmente, no entanto, os seus raciocínios não confirmavam o êxito da compreensão fenomenológica. Por exemplo, os padrões de interferência previstos para elétrons e fótons individuais, na ausência de detectores, não eram explicados comodamente, devido à interpretação corpuscular intrínseca adotada pelos alunos.

As bancadas virtuais e as interpretações com representações específicas para os resultados da dupla fenda contribuíram no quesito de previsibilidade de respostas dos alunos diante de cada configuração experimental. No entanto, em suas explicações, prevaleceram as cargas culturais vivenciadas, as representações das quatro principais interpretações não foram mencionadas explicitamente nos momentos direcionados à análise da dupla fenda (TREVISAN; SERRANO, 2018).

Em relação à compreensão conceitual acerca dos resultados obtidos no IMZ, esperávamos que os alunos executassem uma modelização para entender e explicar os resultados experimentais. Essa modelização seria fundamentada em suas observações acerca das abordagens de cada uma das quatro principais interpretações da MQ. Ou seja, uma transposição das explicações da dupla fenda para as do IMZ. Contudo, os possíveis modelos teóricos direcionados à compreensão conceitual do IMZ foram construídos com base em

situações vivenciadas ao longo de suas trajetórias acadêmicas, nas quais boa parte reforçam a postura clássica e realista.

A partir desses resultados obtidos em nosso experimento piloto surgiu a necessidade de alterações no planejamento e execução das atividades. A mudança principal aconteceu na duração de cada etapa do experimento, oportunizando, principalmente, mais dinâmica nas interações sociais durante a apresentação dos *storyboards*. Haja visto que, de acordo com Trevisan e Serrano (2018), os resultados experimentais foram internalizados, mas a carga representacional que remete ao desenvolvimento conceitual para a construção e estabelecimento de uma interpretação privada, que desse conta da explicação dos resultados, ainda se demonstrou inclinada aos conceitos clássicos.

Diante deste cenário, as atividades realizadas com os estudantes foram planejadas e executadas em sete etapas, que serão apresentadas e caracterizadas de acordo com o contexto em que foram promovidas, isto é, cada etapa contemplará os três experimentos realizados, evidenciando as possíveis mudanças ocorridas em cada evento:

5.5.1 Etapa I: Teste I

No primeiro momento, o Teste I foi construído, validado pelos autores e, posteriormente, aplicado individualmente aos estudantes. O teste constituído por questões abertas e fechadas (já discutidas na seção 5.4.1) tem como objetivo verificar, antes de qualquer intervenção social, cultural e hipercultural (propostas pela pesquisa), os conhecimentos dos alunos sobre conceitos que os possam levar a uma interpretação privada na explicação do comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética nos contextos da dupla fenda e do IMZ. O mesmo teste foi aplicado no Experimento Piloto, no Experimento da IES “A” que passaremos a chamar de Experimento A, e no Experimento da IES “B” que será chamado de Experimento B.

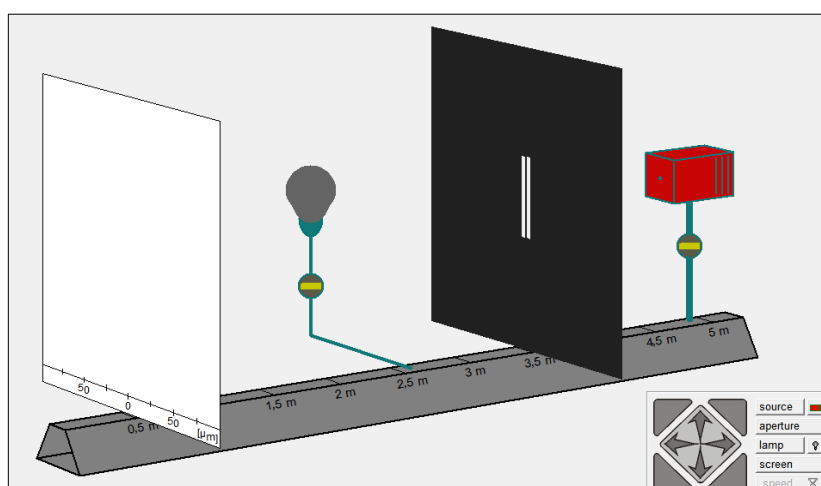
Duração da resolução do Teste I: Em todos os experimentos, a resolução do teste teve uma duração média de 2 horas-aula.

5.5.2 Etapa II: Atividade com os *softwares* computacionais

Nesta fase, foi entregue aos licenciandos dois guias de atividades (apresentados anteriormente na seção 4.4.2) para conduzir a utilização dos dois *softwares* propostos. Os simuladores foram empregados segundo a abordagem P.O.E., na qual os estudantes são

chamados a prever o comportamento de uma situação-problema, ou de um experimento, observar a simulação e, após essas etapas, explicar possíveis diferenças entre suas concepções e o observado (TAO; GUNSTONE, 1999). É durante esse estágio que acreditamos ocorrer a possível internalização dos *drives* intrínsecos às representações computacionais. O *software A* - Fenda Dupla de Young (Fig. 41) - permite observar o comportamento de objetos clássicos e quânticos ao passarem por fendas estreitas e muito próximas.

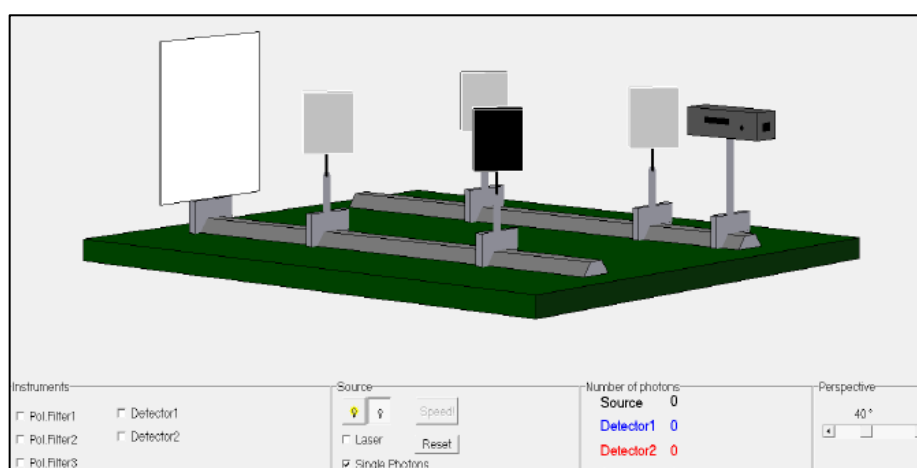
Figura 41 - Arranjo experimental virtual da Fenda Dupla de Young.



Fonte: Extraído do próprio *software*.

O *software B* - Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (Fig. 42) - permite ao usuário observar o fenômeno de interferência produzido por um feixe de luz e por fótons individuais.

Figura 42 - Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder.



Fonte: Extraído do próprio *software*.

A interação com os simuladores aconteceu individualmente nos computadores particulares dos acadêmicos. Tanto no Experimento Piloto quanto nos Experimentos A e B, os guias das atividades foram os mesmos.

Duração da atividade: Em todos os experimentos, a interação com as bancadas virtuais teve uma duração média de 4 horas-aula em sequência.

5.5.3 Etapa III: Teste II.

Nesta terceira etapa da investigação, o Teste II foi construído, validado pelos autores e, posteriormente, aplicado individualmente aos estudantes, na aula seguinte a interação com os simuladores. O teste constituído por questões abertas e fechadas (já discutidas na seção 5.4.3) tem como objetivo verificar as possíveis alterações nas concepções dos estudantes acerca dos experimentos da dupla fenda e do IMZ. Ressaltamos que o contato com os experimentos virtuais proporciona aos acadêmicos a observação e a necessidade de interpretação dos resultados levantados ao longo dos exercícios indicados pelos guias. Desta forma, as diferenças das respostas do Teste I e II podem ser creditadas as interações com os *softwares*.

O mesmo teste foi aplicado no Experimento A e no Experimento B. O Teste II do Experimento Piloto se difere apenas por não possuir a sequência da questão, na qual o aluno era conduzido a representar o caminho do objeto quântico ao longo do *setup* experimental.

Duração da resolução do Teste II: Em todos os experimentos, a resolução do teste também teve uma duração média de 2 horas-aula.

5.5.4 Etapa IV: Report Aloud – Primeiro Momento

Essa etapa consiste em entrevistas realizadas individualmente com os alunos, tendo como pauta as questões e as respostas dos Testes I e II respondidos anteriormente. Ressaltamos que as entrevistas são as principais fontes de identificação das representações mentais e *drivers* dos estudantes.

O objetivo principal desta primeira entrevista é, além testemunhar a explicação do acadêmico para as suas resoluções das questões, buscar que o aluno exponha as suas concepções antes e após as atividades com as bancadas virtuais. Assim, é possível verificar quais processos de pensamento foram constituídos nos dois momentos de resolução dos testes, identificando possíveis modificações e/ou construções de representações mentais e *drivers*.

As entrevistas foram conduzidas de acordo com o protocolo *Report Aloud* (TREVISAN et. al., 2019). Nos Experimentos Piloto e A, as entrevistas foram realizadas em momentos extra aula, já no Experimento B, as entrevistas aconteceram em período de aula, com uma escala de horários pré-determinada para que um estudante não observasse a entrevista do outro.

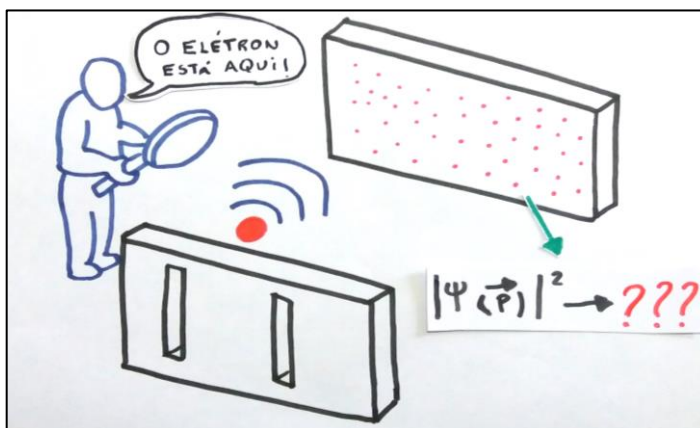
Duração da primeira rodada de entrevistas: Em todos os experimentos, o tempo médio de duração da entrevista com cada aluno foi de 30 minutos.

5.5.5 Etapa V: Instrução didática mediada por *storyboards*.

Nesse momento, que ocorreu na aula seguinte as interações com as bancadas virtuais, os alunos participaram de instruções didáticas em que as quatro principais interpretações da MQ foram apresentadas de acordo com as suas explicações para os resultados possíveis no arranjo experimental da dupla fenda.

O material constituído principalmente pelos *storyboards* foi elaborado por meio de uma adaptação dos conceitos apresentados na linha de trabalhos de Pessoa Jr (1997, 2006 e 2008). Buscamos fornecer representações que idealizassem o comportamento do objeto quântico em virtude das diferentes interpretações reconhecidas. Nosso trabalho fundamenta-se nas ideias de Bunge para os modelos científicos. Desta forma, retratamos os objetos-modelos, relacionando-os com o modelo teórico que prevê o seu comportamento, isso tudo dentro de uma teoria mais ampla. Na Fig. 43, a seguir, vemos um exemplo de representação “macroscópica” do objeto quântico sob o ponto de vista da interpretação dualista realista.

Figura 43 - Exemplo de uma representação da interpretação dualista realista



Fonte: Os autores.

Como já explicamos no capítulo 4, as representações nos *storyboards* são alusivas às modelizações realizadas sob o ponto de vista das interpretações. Ressaltamos a consciência a respeito das ilustrações não caracterizarem em termos de observação experimental direta o objeto quântico.

Duração da Instrução Didática: Nos três experimentos em que as instruções didáticas aconteceram, as durações foram distintas. Abaixo são listadas as durações dessa etapa em cada

experimento juntamente com as propostas e alterações realizadas nas sucessivas implementações.

Experimento Piloto: Nesta instância, a instrução didática teve uma duração de 4 horas-aula. A proposta para esta abordagem conceitual era composta por dois momentos. Isto é, primeiramente foram retomados conceitos fundamentais da MQ, como vetores de estado, notação de Dirac e o princípio da superposição. Essa etapa inicial com duração de aproximadamente 1 hora-aula tinha o objetivo de apenas recordar os licenciandos acerca de termos e conceitos que são abordados nas interpretações da MQ, tendo em vista que o grupo de três acadêmicos já havia concluído a disciplina “Mecânica Quântica” na IES “A”.

As 3 horas-aula seguintes foram dedicadas para a exposição das ideias de cada um dos quatro grandes grupos interpretativos juntamente com as suas representações, fruto da modelização realizada, para caracterizar o comportamento do objeto quântico ao longo do *setup* experimental. O quadro 5 exhibe as configurações do aparato da dupla fenda que foram explorados em aspectos de resultado e explicação teórica, sob o plano de fundo de cada grupo interpretativo.

Quadro 5 – Configurações da Dupla fenda explorada nos *storyboards*.

<i>Regime Clássico</i>	<i>Regime Quântico</i>	
	Fonte: Elétrons Individuais	Fonte: Fótons Individuais
Fonte: Objetos Macroscópicos	✓ Sem detector	✓ Sem detector
	✓ Com detector	✓ Com detector

Fonte: A pesquisa.

Experimento A: Neste cenário, as atividades didáticas mediadas principalmente pelos *storyboards* tiveram duração aproximada de 10 horas-aula. Este tempo a mais que o dedicado ao experimento piloto, deve-se a dois principais fatores, a quantidade de licenciandos na turma e ao acréscimo de conceitos introdutórios na parte inicial da instrução didática.

Com um número maior de acadêmicos, as aulas tiveram mais momentos de diálogo ao longo das atividades, conseqüentemente o tempo para estudo do material elaborada se alongou. Essa dinâmica com participação dos alunos proporciona mais envolvimento e pode potencializar a apropriação dos conceitos abordados.

Durante a instrução didática no experimento piloto percebemos que os licenciandos não recordavam alguns fenômenos e conceitos, os quais consideramos pré-requisito para um

entendimento adequado das diversas conjecturas defendidas pelas correntes interpretativas. Sem entrar no quesito de aprofundamento conceitual, sentimos a necessidade de inserir, neste momento, uma explanação, ainda que introdutória, acerca da correlação quântica, não localidade e o postulado de Born das probabilidades.

Nessa etapa, levamos em consideração o avanço da turma dentro da disciplina, isto é, no momento das intervenções didáticas os conteúdos direcionados ao formalismo quântico ainda não tinham sido estudados formalmente, portanto, foi desempenhada uma explicação com ênfase conceitual mais aprofundada nas definições de vetores de estado, sistemas quânticos, princípio da superposição, entre outros, para que os pressupostos das interpretações pudessem ser compreendidos.

Neste experimento, as configurações do aparato da dupla fenda que foram explorados em aspectos de resultado e explicação teórica, sob o plano de fundo de cada grupo interpretativo são as mesmas do quadro 2.

Experimento B: Neste contexto, as instruções didáticas tiveram uma duração aproximada de 12 horas-aula. Pelo fato do componente curricular na IES “B” possuir uma carga horária mais elevada, o professor responsável da disciplina disponibilizou estas 12 horas-aula para essas atividades da investigação.

Nesta etapa, a exemplo do experimento A, os acadêmicos ainda não haviam estudado os conceitos que adotamos como pré-requisitos para a compreensão das correntes interpretativas. Desta forma, mantemos a mesma dinâmica e preocupação com a explanação didática dos conteúdos introdutórios.

Uma importante alteração foi realizada nos *storyboards* dessa etapa, foi acrescentada uma situação que modifica a configuração no arranjo experimental da dupla fenda. O caso acrescentado é chamado de “Escolha Demorada” ou “Escolha Retardada”. Em uma explicação mais simplificada, leva esse nome pelo fato de um detector/observador só ser acrescentado no arranjo experimental logo após a fonte emitir um elétron.

A necessidade de acrescentar esse formato de experimento surge após uma breve análise primária dos dados oriundos do Experimento A, na qual constatamos inclinações a adoção da interpretação dualista positivista, pelo fato de nenhum dos arranjos experimentais trabalhados anteriormente tivessem evidenciado uma possível “anomalia” da interpretação, isto é, uma configuração experimental na qual o viés dualista positivista não exibisse uma explicação totalmente satisfatória para o resultado fornecido, dentro do nível de profundidade teórica adotado pela investigação.

O quadro 6 resume as configurações do aparato da dupla fenda que foram explorados no Experimento B.

Quadro 6 - Configurações da Dupla fenda explorada nos *storyboards* (Experimento B).

<i>Regime Clássico</i>	<i>Regime Quântico</i>		
Fonte: Objetos Macroscópicos	Fonte: Elétrons Individuais	Fonte: Fótons Individuais	Fonte: Elétrons Individuais
	✓ Sem detector	✓ Sem detector	Escolha Demorada
	✓ Com detector	✓ Com detector	

Fonte: A pesquisa.

Em face ao cenário descrito, acreditamos que seja nesta etapa de instruções didáticas, mediadas essencialmente pelos *storyboards*, na qual os licenciandos passam a internalizar as conjecturas das interpretações, que são mais satisfatórias para compreender e justificar os resultados observados no experimento da dupla fenda. Neste momento, a modelização intrínseca pode ir se desenhando, caso o aluno passe a buscar explicações para o IMZ, transladando as teorias apresentadas pelas interpretações para a dupla fenda. Assim, pode ocorrer um conflito de representações mentais e concepções ou uma sustentação e reforço do conhecimento já construído.

5.5.6 Etapa VI: Teste III.

Nesta sexta etapa da investigação, o Teste III foi aplicado individualmente aos estudantes, na aula seguinte, as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*. O teste constituído por questões abertas e fechadas (já discutidas na seção 5.4.5) tem como propósito verificar as concepções e interpretações dos estudantes após eles cumprirem as diversas etapas do Experimento.

Reforçamos que é na resolução do Teste III, onde os estudantes podem estabelecer interpretações mais consistentes, devido a carga conceitual adquirida pela interação com as bancadas virtuais e *storyboards*. Neste momento, as concepções construídas antes do início das atividades do estudo, podem ser reforçadas como podem ser modificadas.

O Teste III do Experimento B possui uma questão a mais que o do Experimento A. A questão acrescida aborda o experimento da escolha demorada. O restante das questões são iguais, mantendo a mesma estruturação. A exemplo do Teste II, o Teste III do Experimento

Piloto se difere por não possuir a sequência da questão, na qual o aluno era conduzido a representar o caminho do objeto quântico ao longo do *setup* experimental e também por não apresentar a questão direcionada a situação da escolha demorada.

Duração da resolução do Teste III: Em todos os experimentos, a resolução do teste III, a exemplo dos demais testes, teve uma duração média de 2 horas-aula.

5.5.7 Etapa VII: *Report Aloud* – Segundo Momento

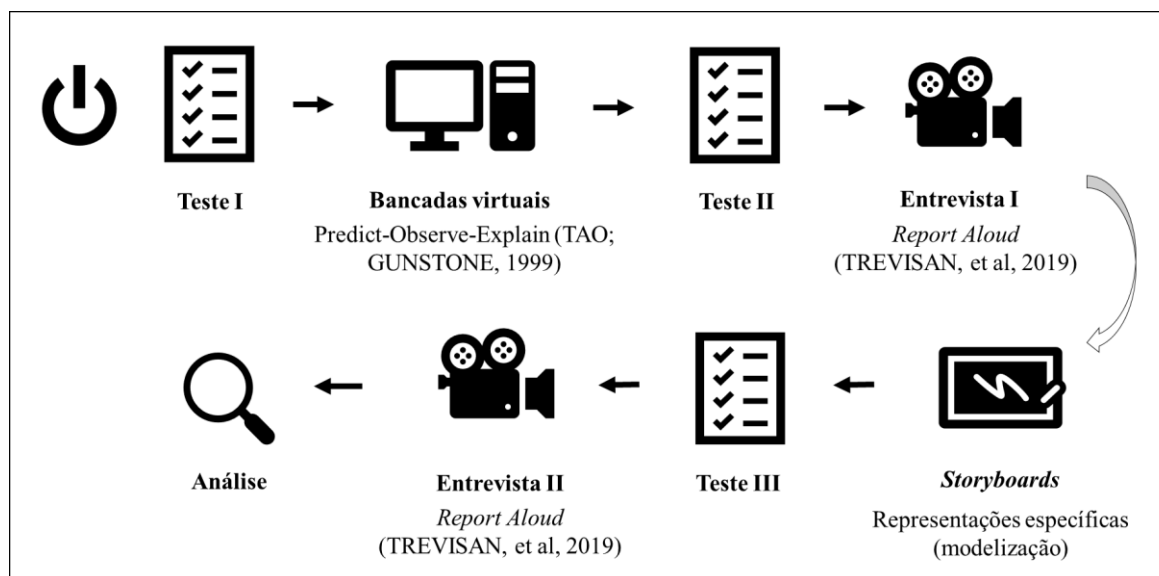
A segunda rodada de entrevistas configura a última etapa do Experimento. Também realizada individualmente, a segunda entrevista teve como pauta as perguntas e respostas do Teste III. O propósito central desta etapa é a verificação da possível evolução e/ou estabelecimento interpretativo dos licenciandos. As representações mentais e *drivers* detectados no *Report Aloud* possibilitam analisar as interpretações dos estudantes e também apresentam a possibilidade de estimar as contribuições da mediação composta basicamente pelos *storyboards* durante as ações pedagógicas.

Este segundo momento de entrevistas também foi conduzido pelo protocolo *Report Aloud* (TREVISAN et. al., 2019). A exemplo das entrevistas anteriores, nos Experimentos Piloto e A, as entrevistas foram realizadas em momentos extra aula, já no Experimento B, as entrevistas aconteceram em período de aula, com uma escala de horários pré-determinada, para que um estudante não observasse a entrevista do outro.

Duração da primeira rodada de entrevistas: Em todos os experimentos, o tempo médio de duração da entrevista com cada aluno foi de 35 minutos.

Para facilitar a compreensão da segmentação e ordem cronológica das atividades realizadas a figura 44, abaixo, organiza as ações que compõe o Experimento.

Figura 44 – Etapas do Experimento



Fonte: A pesquisa.

O passo seguinte a realização do Experimento é o movimento da análise dos dados produzidos, a próxima seção elucida os métodos responsáveis por esse processo da investigação.

5.6 A METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS DADOS

Após a realização de todas as entrevistas, a etapa seguinte passa a ser a análise dos dados. Para tanto, todas as entrevistas foram transcritas e os demais instrumentos de coleta de dados foram separados. A linguagem verbal, presente nas transcrições das entrevistas, e a linguagem escrita, presente nos testes, foram apreciadas com base em inspirações da análise textual discursiva de Moraes e Galiazzi (2007). Por sua vez, a linguagem não verbal, caracterizada pelos gestos descritivos realizados pelos estudantes durante as entrevistas, e principal ferramenta de identificação de representações mentais e *drivers* adotada, foi analisada a partir da adaptação da metodologia oferecida pela linha de trabalhos de Monaghan e Clement (1999), Clement (2006) e Clement e Stephens (2010). Essas metodologias de análise serão apresentadas em maiores detalhes a seguir.

5.6.1 Análise da Linguagem Verbal e Escrita

Para efetuar a análise sobre linguagem verbal, presente nas transcrições das entrevistas, e a linguagem escrita, presente nos testes, nos inspiramos nos pressupostos da Análise Textual

Discursiva (ATD) de Moraes e Galiazzi (2007). Conforme a descrição feita pelos autores, a ATD pode ser entendida como

O processo de desconstrução, seguido de reconstrução, de um conjunto de materiais linguísticos e discursivos, produzindo-se a partir disso novos entendimentos sobre os fenômenos e discursos investigados. Envolve identificar e isolar enunciados dos materiais submetidos à análise, categorizar esses enunciados e produzir textos, integrando nestes descrição e interpretação, utilizando como base de sua construção o sistema de categorias construído (MORAES, GALIAZZI, 2007, p. 112).

Essa metodologia consiste na análise e interpretação dos diferentes materiais obtidos durante a pesquisa, com o objetivo de compreender de maneira mais profunda as informações contidas no objeto em estudo. Essa análise é caracterizada por três etapas: unitarização, categorização e inferência emergente.

O processo de unitarização compreende o recorte e a fragmentação de textos reunidos a partir dos instrumentos de coleta, resultando em unidades múltiplas cada vez menores. “Unitarizar um texto é desmembrá-lo, transformá-lo em unidades elementares, correspondendo a elementos discriminantes de sentidos, significados importantes para a finalidade da pesquisa” (MORAES, GALIAZZI, 2007, p.49). Ainda de acordo com os autores, esse processo proporciona condições para uma reconstrução criativa da compreensão dos fenômenos focalizados.

A segunda etapa, a categorização, estabelece relações entre os fragmentos da etapa anterior. Nisso, de acordo com Moraes e Galiazzi (2007, p.75), “um conjunto desorganizado de elementos unitários, é ordenado no sentido de expressar novas compreensões atingidas ao decorrer da pesquisa”. As categorias podem surgir *a priori* ou emergir *a posteriori*. A primeira refere-se à construção de categorias já definidas previamente pelo pesquisador antes do processo de análise. E a segunda implica a construção de categorias baseadas nas informações contidas no material a ser analisado.

A última etapa, as inferências emergentes, é possível a partir das análises e interpretações de uma investigação, que possibilita a construção pelo pesquisador de um metatexto, o produto final de uma análise textual discursiva. Os autores descrevem um metatexto como a “[...] expressão por meio da linguagem das principais ideias emergentes das análises e apresentação dos argumentos construídos pelo pesquisador em sua investigação, capaz de comunica a outros as novas compreensões atingidas” (MORAES, GALIAZZI, 2007, p.94).

A análise textual discursiva considera as realidades incertas e instáveis “[...] sendo um processo fundado na liberdade e na criatividade, não possibilita que exista nada fixo e

previamente definido” (MORAES, GALIAZZI, 2007, p.166), conferindo ao pesquisador ampla liberdade de criar e de se expressar.

Nos inspirando nesses pressupostos, a análise que será apresentada no próximo capítulo traz excertos em meio as inferências dos contextos pertinentes ao movimento da investigação. Esses recortes, tanto das transcrições quanto dos manuscritos dos testes, buscam refletir o mais fidedigno possível à interpretação dos licenciandos a respeito dos questionamentos propostos.

5.6.2 Análise dos Gestos Descritivos

A metodologia de análise gestual adotada por esta pesquisa é baseada pela linha de trabalhos de Monaghan e Clement (1999) e Clement e Stephens (2010). Esses trabalhos sugerem o estabelecimento de uma relação entre imagens mentais presentes na estrutura cognitiva do aluno e gestos por ele realizados. Tratando a estreita relação entre as imagens mentais e os gestos dos estudantes, considera-se essas como evidências concretas de processos cognitivos desenvolvidos pelos sujeitos quando indagados sobre determinadas situações/problemas.

Monaghan e Clement (1999) realizaram um estudo sobre o uso de uma simulação computacional no ensino de conceitos acerca do movimento relativo com alunos do ensino médio norte-americano, e buscaram verificar se a simulação pode auxiliar na melhora da compreensão dos conceitos abordados. Em sua base metodológica qualitativa, os autores realizaram entrevistas com três alunos após a realização das atividades, pretendendo verificar a eficácia da simulação computacional como ferramenta pedagógica. Monaghan e Clement (1999) observaram que os alunos combinavam as afirmações verbais com gestos descritivos relacionados às suas explicações, sugerindo uma tentativa de visualização do problema.

Essa relação verbal-gestual pode ser observada no seguinte excerto

Aluno: [...] vi o carro preto se mover mais rápido (**move a mão direita rapidamente para a esquerda**) do que o carro branco, e o carro branco estava se movendo para trás como se o avião (**aponte para a tela do computador**) passasse por ele. E o carro preto se move mais rápido, como se o avião estivesse em direção a ele (**move a mão direita para a esquerda**). (MONAGHAN; CLEMENT, 1999, p.922, grifo nosso)

Desta forma, os autores utilizaram como um dos indicadores para a análise os movimentos de mãos sugerindo que os estudantes estavam se utilizando de imagens dinâmicas de simulações mentais durante a tarefa de resolução de problemas de movimento relativo.

Diante disso, acredita-se na possibilidade de se obter o conhecimento implícito do aluno inerente as suas visualizações internas (simulação mental do raciocínio) após a mediação hipercultural (em forma de simulação computacional), por meio da sua externalização gestual.

A interpretação dos gestos poderá fornecer informações que não são identificadas apenas através da fala. Contudo, reforçamos a importância da associação gestual e verbal na transmissão de informações, sem que tais recursos empregados durante a explicação sejam redundantes. Isto é, a informação transmitida gestualmente está relacionada com a transmitida verbalmente sem que ambas devam ser necessariamente a mesma informação transmitida. Portanto, os gestos podem auxiliar na transmissão de informação sempre que houver dificuldade de expressão verbal.

Assim, é possível identificar padrões de gestos e relacioná-los com os conhecimentos implícitos existentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Aqui, consideramos os gestos uma linguagem própria, e não complemento da linguagem verbal, sendo que a união desses dois recursos é considerada importante ferramenta na identificação dos conceitos adquiridos e/ou modificados após as atividades propostas.

Stephens e Clement (2010) realizaram um estudo no qual buscaram a identificação de raciocínios e imagens mentais de estudantes em nível de ensino médio acerca de conceitos básicos de força e movimento presentes na teoria gravitacional. Os autores descrevem a análise gestual juntamente com a análise verbal como metodologia utilizada na identificação de evidências das utilizações dos três raciocínios categorizados pelo estudo, sendo eles nomeados por analogias, casos extremos e experimentos imaginários.

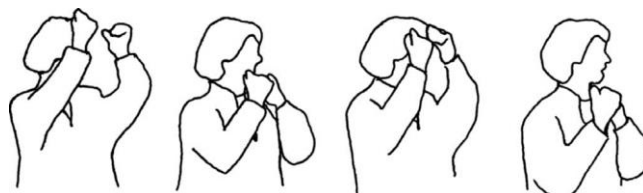
Os dados foram produzidos através de gravações de áudio e vídeo realizadas durante a disciplina de Física. As câmeras estavam dispostas na sala de aula, de modo que todos os alunos pudessem ser observados. Desta maneira, todas as instruções do professor e todas as participações dos alunos durante as aulas foram registradas.

Seguindo o movimento da análise, os pesquisadores codificaram os vídeos a partir das imagens descritivas, sendo que os gestos parecem representar um objeto, um local ou uma ação imaginária. Logo, os gestos são tomados como a indicação de que uma imagem mental está sendo utilizada para a expressão de ideias acerca de um determinado tema. Stephens e Clement (2010) classificaram em três categorias os gestos obtidos, os que representam uma forma e indicam imagens mentais consideradas estáticas, a categoria de gestos que representa o movimento de um objeto e indicam imagens mentais dinâmicas, e a categoria de gestos que indicam a ação de uma força. Ressaltamos que essa classificação adotada pelos autores segue seus propósitos investigativos, outras formas de organização poderiam ser atribuídas aos

mesmos conjuntos de gestos, na seção seguinte apresentaremos outros exemplos de classificação e análise gestual, em estudos inclinados ao ensino de física e química em cursos de graduação.

A figura 45, a seguir, apresenta o exemplo elaborado pelos autores, para um gesto indicativo de força.

Figura 45 - Gestos descritivos Indicativo-Força. “A Terra faz um puxão maior em você”



Fonte: Stephens e Clement, 2010, p. 6

Nesta sequência de imagens o sujeito representa com as mãos a atração sentida pela influência do campo gravitacional terrestre. Através das imagens obtidas durante as gravações, Stephens e Clement (2010) apresentam outros gestos descritivos utilizados em sua análise como indicadores de imagens mentais, conforme mostrado na figura 46.

Figura 46 - “O livro simplesmente voaria para o espaço”



Fonte: Stephens e Clement, 2010, p. 8.

O estudante, ao comentar sobre uma situação hipotética na qual a gravidade deixaria de existir, gesticula com as mãos o movimento de um livro que inicialmente estaria em repouso sobre uma mesa horizontal. Portanto, a previsão do comportamento do livro não é só expressada verbalmente, mas em conjunto com um gesto descrevendo o movimento, o que caracteriza a evidência de uma imagem mental utilizada pelo estudante para pressupor o movimento do livro verticalmente. A figura 47, a seguir, representa um aluno imaginando uma bola flutuando no espaço durante sua explicação a respeito do movimento de rotação da Terra e da força gravitacional, este também é um indicativo de uma imagem mental construída e utilizada para pensar no problema proposto e em sua solução.

Figura 47 – Representação de uma bola flutuando no espaço



Fonte: Stephens e Clement, 2010, p. 9

Tendo em vista os desdobramentos metodológicos adotados por Stephens e Clement (2010), ressaltamos a importância dos gestos descritivos para identificar imagens mentais e raciocínios dos estudantes na resolução de problemas e compreensão de conceitos estudados. Esse movimento pode revelar o conhecimento implícito inerente à visualização interna (simulação mental) através da externalização por análise gestual (KRAUSS, 1998; HOSTETTER; ALIBALI, 2004; SCHERR, 2008).

A seguir, apresentaremos o capítulo da análise dos dados juntamente com os resultados e asserções de valores obtidas ao longo do caminho percorrido por esta investigação.

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão analisados os dados oriundos do experimento que compõe esta pesquisa, lembrando que a sua elaboração e execução foram descritas no capítulo anterior. A partir desses dados obtidos através dos guias, testes e principalmente por meio das entrevistas gravadas em áudio e vídeo, levantamos as representações mentais e os *drivers* dos estudantes com o propósito de analisar seus possíveis estabelecimentos, ainda que de forma incipiente, em uma das quatro principais correntes interpretativas da MQ. Neste tocante, nos atentamos para as possíveis influências dos mecanismos externos de mediação nas interpretações privadas dos licenciandos em Física. Além do mais, são apuradas as articulações das representações mentais e *drivers* dos estudantes, com o intuito de verificar o processo de modelização científica acerca do comportamento do objeto quântico, sobretudo no *setup* experimental do IMZ.

Quanto à organização da escrita deste capítulo, optamos pela apresentação detalhada da análise dos dados e discussão dos resultados de quatro alunos. Essa escolha deve-se ao fato de esses alunos terem externalizado tendências mais expressivas à adoção de cada uma das quatro interpretações da MQ. Melhor dizendo, cada um dos quatro alunos representa uma interpretação da MQ, sendo sua escolha justamente fruto da própria articulação de representações mentais e *drivers* que convergem para as conjecturas de determinada interpretação. Por exemplo, dentre os alunos dos quais suas interpretações privadas mais enquadram-se com a interpretação Dualista Realista, serão analisados e apresentados os dados apenas do licenciando que evidenciou maior estabelecimento nesta interpretação, isto é, o que mais fez uso das ideias dessa perspectiva durante as justificativas para os resultados observados nos arranjos experimentais.

Ao final do capítulo, teceremos considerações acerca das potencialidades das instruções didáticas, intentando o reforço do levantamento de evidências para alcançar as respostas às perguntas norteadoras da investigação. Ademais, buscaremos comparar nossos resultados com estudos anteriores e estabelecer um grau de generalização das asserções de valor e conhecimento levantadas pela pesquisa.

6.1 O MOVIMENTO DA ANÁLISE

O movimento de análise se deu pelo confronto das situações investigadas com o referencial teórico adotado, com o intuito de buscar significado nos dados observados. O primeiro passo no processo de análise foi o da transcrição das entrevistas dos testes, já que o conteúdo verbal é analisado juntamente com os gestos descritivos dos alunos. Nas transcrições

e menções no texto não são utilizados os nomes dos alunos, que passarão a ser chamados pela letra “A”, seguida de uma outra letra “A” caso este aluno faça parte da IES “A” (privada) ou da letra “B” caso seja aluno da IES “B” (pública). Ambos receberão um número que seguirá uma sequência após as letras, do número 1 até o 17. O quadro 7, a seguir, resume identificações atribuídas aos sujeitos da pesquisa.

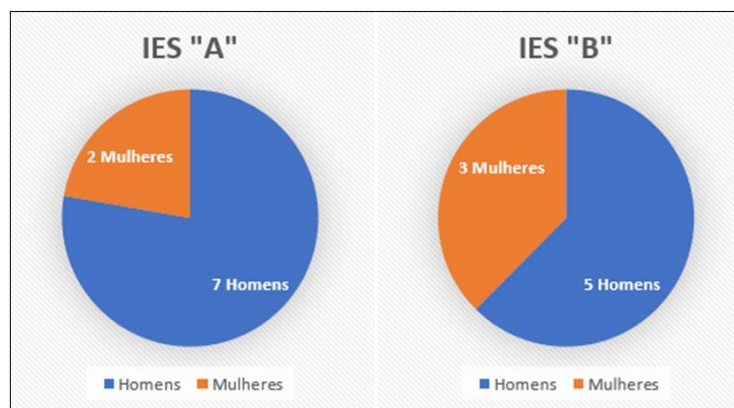
Quadro 7 – Identificação dos sujeitos participantes da pesquisa.

IES “A” – Privada	IES “B” – Pública
<u>Alunos:</u> AA1; AA2; AA3; AA4; AA5; AA6; AA7; AA8.	<u>Alunos:</u> AB9; AB10; AB11; AB12; AB13; AB14; AB15; AB16; AB17.

Fonte: A pesquisa.

Para uma melhor caracterização da amostra, foram feitas algumas questões iniciais no Teste I, relacionadas com o gênero dos acadêmicos, que cursam pela primeira vez ou não a disciplina em questão, se já haviam cursado algum componente curricular que tenha abordado os conteúdos de MQ e se já estavam atuando como docentes. O gráfico retratado na Fig. 48 expressa a diferença na quantidade de homens e mulheres nas turmas.

Figura 48 – Quantidade de homens e mulheres em cada IES do estudo.



Fonte: A pesquisa.

Em relação ao segmento da análise dos resultados, para cada estudante considerado representativo dentro do contexto das interpretações, serão apresentados os resultados triangulados (linguagem verbal e gestual presente nos testes, guias e entrevistas) para todos os arranjos experimentais propostos pelo estudo. Dessa forma, serão primeiramente identificadas e discutidas as representações mentais e *drivers* do aluno representativo, juntamente com o estabelecimento de relações com os demais estudantes pertencentes a corrente interpretativa em questão. Só então um segundo grupo interpretativo será apresentado, seguindo nessa direção até o término da análise. Assim, a apresentação dos dados em companhia das suas análises

seguirá uma sequência, na qual todo o conteúdo de um conjunto de sujeitos enquadrados em uma interpretação da MQ é apreciado antes do próximo ser exibido.

Antes de iniciarmos a descrição factual dos resultados em companhia de suas devidas análises, apresentaremos, na seção seguinte, um diagnóstico de caráter introdutório que sinaliza genericamente respostas encontradas para as questões norteadoras deste estudo.

6.2 SINOPSE DOS RESULTADOS LEVANTADOS

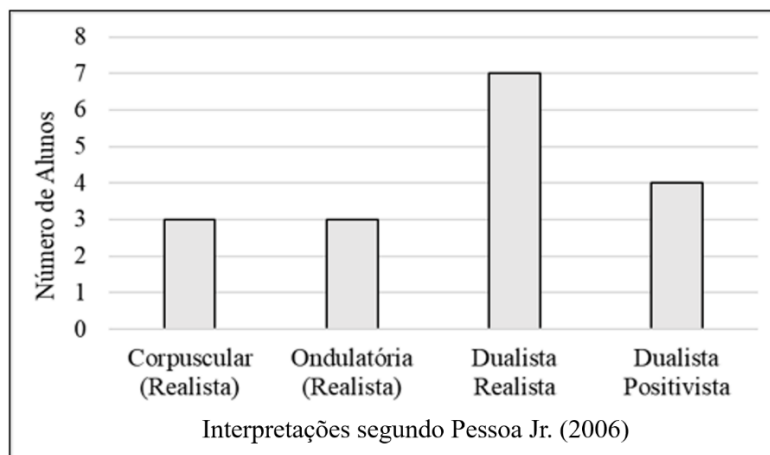
É apropriado ressaltar que os resultados deste estudo surgem a partir do estabelecimento de mecanismos de análise verbal e gestual ao longo da investigação, mais precisamente no momento da leitura e interpretação dos dados oriundos de diferentes fontes, como o conteúdo dos guias de atividades e testes aplicados, e sobretudo as gravações em áudio e vídeo dos momentos do *report aloud*.

Diante deste cenário, as respostas para as perguntas norteadoras desta pesquisa puderam ser construídas. Em relação à promoção do estabelecimento do licenciando em Física em uma corrente interpretativa, ainda que de modo incipiente, por conta da interação com os mecanismos externos de mediação promovidos nas atividades didáticas, pode-se identificar a sua ocorrência.

Sendo assim, o movimento da análise sobre as explicações externalizadas pelos licenciandos nos possibilitou a identificação da presença dos quatro principais grupos de interpretações. Isso quer dizer que as bancadas virtuais juntamente com os *storyboards* proporcionaram subsídios representacionais e conceituais para que os alunos assimilassem as conjecturas que mais lhe favorecessem no momento de justificar as respostas previstas para o anteparo de visualização.

Em termos quantitativos, a Fig. 49 exhibe a distribuição das interpretações adotadas pelos estudantes, ainda que de forma incipiente.

Figura 49 - Relação numérica das correntes interpretativas adotadas.



Fonte: A pesquisa.

O gráfico nos mostra que a interpretação dualista realista obteve mais destaque nas explicações formuladas pelos alunos no momento de fundamentar em suas respostas nos testes. Analisando a postura interpretativa dos alunos, confirmamos que elementos conceituais de todas as quatro correntes interpretativas apareceram nas explicações dos resultados dos experimentos. Isso nos diz que as bancadas virtuais juntamente com os *storyboards* forneceram possibilidades de diferentes formas para analisar ontologicamente e epistemologicamente um mesmo resultado previsto pelo formalismo da MQ e considerado indiscutível e consolidado pela comunidade científica.

A partir desses dados, verificamos que aproximadamente 76 % dos licenciandos seguem uma postura epistemológica realista, isto é, independentemente de como o estudante considera o objeto quântico, essa definição acontece praticamente sem uma análise primária acerca do arranjo experimental e do seu consequente resultado. Os outros aproximados 24 % adotam uma atitude positivista, ou seja, a definição acerca do comportamento do objeto quântico ocorre após o conhecimento das condições de contorno do experimento e a sua previsibilidade do resultado.

De acordo com a literatura, a interpretação adotada com mais ênfase pelos professores nos cursos introdutórios de MQ, mesmo que em muitos casos de forma inconsciente, é a dualista positivista, também conhecida como Escola de Copenhague. Porém, em nosso estudo, essa não foi a corrente interpretativa com maior número de adeptos (em torno de 23 %) aos seus princípios durante as manifestações das compreensões sobre os diferentes arranjos experimentais.

De modo geral, fundamentados nestes resultados, podemos aferir que as representações específicas, ou seja, os objetos-modelos pertencentes aos modelos teóricos construídos nos *storyboards*, contribuíram para o preenchimento de lacunas conceituais nas interpretações

privadas dos licenciandos durante as análises das diferentes configurações experimentais da dupla fenda e do IMZ. Este ponto, tratado em nossa primeira questão auxiliar, de fato, é observado nas asserções teóricas manifestadas pelos estudantes em seus raciocínios de previsibilidade e confirmação dos resultados fornecidos pelas bancadas virtuais.

Neste cenário, os pressupostos da TMC (SOUZA, 2004) mostram-se determinantes no direcionamento das instruções didáticas e o consequente estabelecimento interpretativo dos licenciandos. Compete retomar que o surgimento da hipercultura é visto pela TMC (SOUZA, 2004) como consequência de novas formas de interação envolvendo grupos sociais e as tecnologias no nível do indivíduo.

Portanto, os simuladores virtuais e os *storyboards* atuam como mediadores digitais e socioculturais a fim de criar e/ou modificar representações mentais e *drivers* na cognição do indivíduo resultando na aprendizagem dos conceitos quânticos abordados. Dada a natureza das representações mentais, sua mera existência dota o indivíduo com um conjunto de ferramentas lógicas que aumenta sua competência em domínios específicos, mesmo na ausência do sistema externo físico correspondente (SOUZA et al 2012). A partir dessas mediações, adquire um ganho de processamento de informações que se mantém mesmo que a conexão com os mecanismos externos seja interrompida. Esses *drivers* são originados dos mecanismos de mediação externa utilizados pelo indivíduo, que pode ser de natureza psicofísica (quando o indivíduo utiliza de objetos do ambiente como mecanismo de processamento extracerebral), social (devido à conexão social com outros indivíduos por meio da linguagem), cultural (devido à utilização de ferramentas culturais como os próprios *storyboards*) e/ou hipercultural (utilização das bancadas virtuais e TIC em geral).

A segunda pergunta auxiliar do estudo remete a possibilidade de, na busca de explicações para o IMZ, o estudante transpor elementos conceituais específicos de cada grupo interpretativo observados nos *storyboards*. Esta expectativa de modelização particular e voluntária concretiza-se, na medida que os resultados revelam a alocação de conjecturas interpretativas específicas do experimento da dupla fenda no instante de solucionar as questões direcionadas ao IMZ.

Desta forma, quando o licenciando busca compreender e sobretudo explicar os experimentos da dupla fenda e do IMZ, inspirados na interação com os mecanismos externos de mediação, podemos considerar a ocorrência de uma forma de fazer científico, tendo em vista que, na concepção de Pietrocola (1999) a modelização científica é considerada por Bunge a natureza do próprio trabalho científico. Neste sentido, são levantadas evidências que demonstram a descrição ontológica dos objetos quânticos por parte dos estudantes, idealizando

um elemento que não é visualizado diretamente (objeto-modelo), seguida de uma construção sistematizada de proposições que objetivam determinar o comportamento dos objetos quânticos ao longo do setup experimental (modelo teórico).

A seguir, apresentaremos em detalhes a análise e discussão dos dados levantados, e descrevemos as evidências que possibilitaram a composição das respostas para o estudo. Iniciaremos a apresentação dos resultados dos acadêmicos inclinados, ainda que de forma incipiente, à interpretação Dualista Realista, na qual o licenciando AB9 é tomado como aluno representativo.

6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO DUALISTA REALISTA – O LICENCIANDO AB9 COMO ALUNO REPRESENTATIVO.

Inicialmente, é importante lembrar o leitor que, durante todo o estudo, três testes foram aplicados, dois guias foram respondidos através da interação com os experimentos virtuais e duas entrevistas individuais foram realizadas (ver seção 5.5). Portanto, para cada arranjo experimental, avaliamos as respostas e os raciocínios empregados mediante articulação das representações mentais e *drivers* durante resolução e explicação dos problemas. Naturalmente, serão tecidas comparações entre os testes e as entrevistas para buscarmos os mecanismos externos que contribuíram para o estabelecimento dos estudantes na postura interpretativa adotada.

Para a descrição da metodologia de análise na obtenção das evidências que caracterizam os resultados encontrados, selecionamos, como mencionado anteriormente, a realizada sob um estudante representativo dentro da amostra, o AB9, escolhido devido a sua inclinação ontológica e epistemológica nas explicações para a dupla fenda e IMZ mais se aproximar das conjecturas postuladas pela interpretação dualista realista. Ademais, identificamos outros seis licenciandos com posicionamento semelhante, incluídos neste grupo interpretativo, são eles: AA3, AB10, AB11, AB12, AB15 e AB16.

Neste tocante, a análise tomará seu início com a exploração dos arranjos experimentais da dupla fenda.

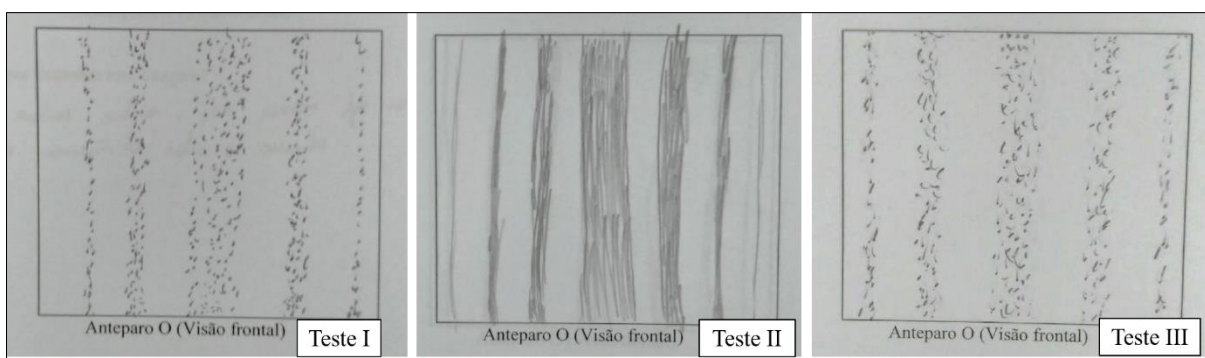
6.3.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.

Para este caso, consideramos o regime clássico do experimento da dupla fenda quando a fonte emite um feixe de luz monocromático e coerente. Essa configuração não foi abordada

na bancada virtual, já que ela não disponibilizava esta opção, no entanto, esteve presente em todos os testes propostos. Esse arranjo experimental geralmente é estudado em disciplinas relacionadas à óptica e a fenômenos ondulatórios que antecedem o estudo introdutório da MQ.

As questões iniciais de cada configuração experimental remetem à previsibilidade do padrão formado no anteparo de observação. Nesta situação, o aluno AB9 acertou a ocorrência do padrão de interferência (franjas claras e escuras) em todos os testes realizados (Fig.50). Isto nos indica que, antes mesmo da participação do estudo, o aluno AB9 já estava convencido do resultado do experimento.

Figura 50 – Respostas desenhadas pelo aluno AB9 em todos os testes.

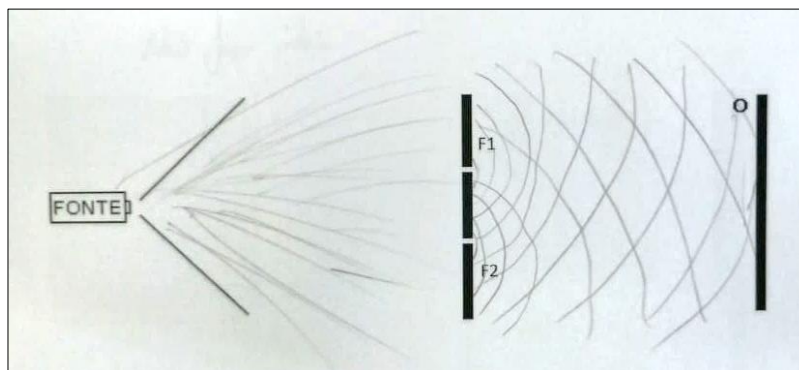


Fonte: A pesquisa.

Quanto a sua explicação para a formação da interferência, no primeiro momento do *Report Aloud* (entrevista I), o aluno remeteu à lembrança da sua interação na disciplina básica de Física II com uma simulação computacional que representava a interferência de ondas mecânicas (água)³⁰, “*como tinha na simulação das ondas, e que tinha interferência com a onda mecânica, foi isso que tomei como base*” (AB9). O licenciando afirmou imaginar o feixe de onda, no momento, igualmente ao desenhado em seu Teste II (Fig. 51), com a interferência acontecendo devido às superposições das ondas após a passagem pelas duas fendas.

³⁰ Esta simulação está disponível para utilização em https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-interference. Acesso em 01 nov. 2019.

Figura 50 – Ilustração do aluno AB9 no Teste II para explicar a ocorrência da interferência.

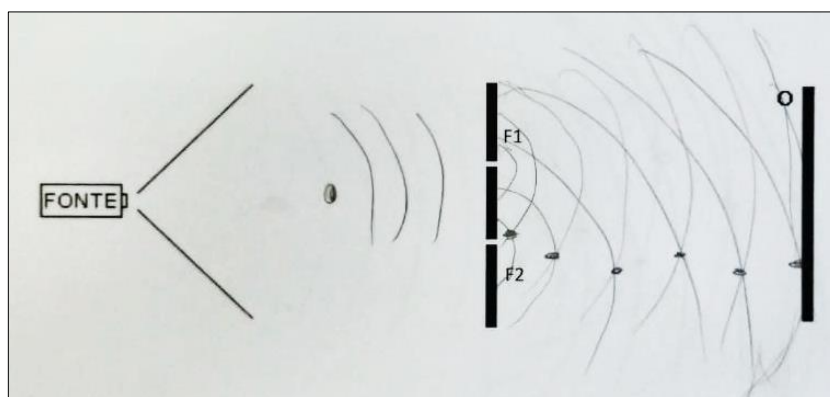


Fonte: A pesquisa.

O estudante também mencionou menor contribuição de uma aula da disciplina Física IV, na qual houve uma breve apresentação do fenômeno da dupla fenda com um feixe de luz, ajudando-o na previsão do resultado.

Após as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards* (Etapa V do estudo, ver seção 5.5.5), as representações mentais e *drivers* do aluno AB9 acerca do feixe de luz nesta configuração experimental sofreram alterações, ainda que o resultado tenha sido o mesmo. Neste segundo momento do *Report Aloud*, as ondas passaram a ser descritas da forma que foram ilustradas na figura 52, a seguir.

Figura 51 - Ilustração do aluno AB9 no Teste II para explicar a ocorrência da interferência.



Fonte: A pesquisa.

Portanto, a explicação para a ocorrência da interferência se modificou; o aluno, ao iniciar a sua justificativa, afirmou “*eu segui nas respostas do meu questionário a interpretação Dualista Realista*” (AB9). E para descrever a formação das franjas claras e escuras, o aluno detalhou a evolução do feixe de luz ao longo do *setup* experimental da seguinte forma:

AB9: Eu representei aqui (apontando para a região próxima a fonte), a partícula com a onda associada, chegando na dupla fenda, depois aqui (apontando para as duas fendas), causando a interferência da onda, e a partícula passando pelos pontos construtivos da onda (Fig. 53),

Figura 52 – AB9 representando um ponto de amplitude máxima por meio de um movimento oscilatório com uma das mãos.

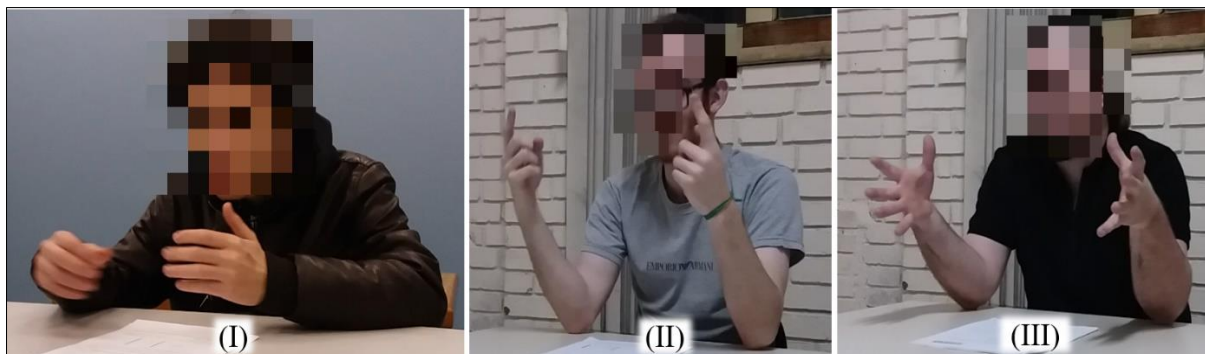


Fonte: A pesquisa.

O aluno imaginou esse comportamento mesmo que a questão tratasse de um feixe de luz, “*no caso do feixe de luz, seriam várias partículas [mas o comportamento permanece o mesmo]*” (AB9), logo, o estudante imaginou o comportamento de um objeto quântico e, em seguida, o expandiu para caracterizar um feixe. Na sequência de sua explicação, ainda ressaltou que a partícula passa apenas por uma das fendas, enquanto sua onda associada atravessa ambas.

Uma explicação com semelhante cunho interpretativo para a formação do padrão de interferência foi, por exemplo, manifestada pelo aluno AA3, “*passa a onda [associada] e a partícula, mas a partícula só cai em determinados pontos, porque as ondas se cancelam* (Fig. 54 – I)” (AA3). A representação do feixe de luz como sendo composto por múltiplos fótons descritos como partículas com ondas associadas também foi indicada explicitamente pelo aluno AB12, “*eu tive aquele pensamento do fóton com a onda piloto, e já quando sai o feixe, para mim seria um monte de fótons saindo em sequência com essas ondas piloto* (Fig. 54 – II)” (AB12), e também pelo aluno AB11, que, ao seguir uma caracterização próxima, retratou o objeto quântico que compõe o feixe de luz da seguinte forma: “*a ideia que eu achei mais interessante é aquela que eu tenho algo como se fosse um corpúsculo emitindo ondas* (Fig. 54 – III), *e a partir daquele corpúsculo emitindo ondas ele caminha entre as ondas*” (AB11).

Figura 53 – (I) AA3 sinalizando pontos de interferências construtivas. (II) AB12 indicando as ondas piloto ligadas aos corpúsculos. (III) AB11 representando as ondas emitidas pelos corpúsculos.



Fonte: A pesquisa.

Seguindo a análise do aluno representativo AB9, ao ser questionado quanto à inspiração para as conjecturas apresentadas, o estudante remeteu às instruções didáticas “foi na aula, com o que foi explicado na aula mesmo” (AB9). Ainda mencionou que a percepção dual para o comportamento do objeto quântico já o acompanhava antes mesmo de iniciar a disciplina introdutória, “eu sempre tive na cabeça, mais ou menos essa ideia, de que não era nem só onda e nem só partícula” (AB9), no entanto, completou afirmando que não sabia ao certo como descrever esse comportamento “eu não sabia falar que era onda associada, que a onda causava interferência... Então foi a [interpretação] que mais encaixou com o que eu já vinha pensando” (AB9).

De acordo com a linguagem verbal dos excertos extraídos, linguagem gestual e as respostas dos testes, podemos confirmar que a mediação hipercultural composta pelos *softwares*, e sobretudo a mediação social-cultural caracterizada pelos *storyboards* possibilitaram ao aluno AB9 uma alteração das representações mentais e *drivers* já existentes, fazendo com que a sua interpretação privada acerca do objeto quântico para esta configuração clássica da dupla fenda se aproxime expressivamente da corrente Dualista Realista.

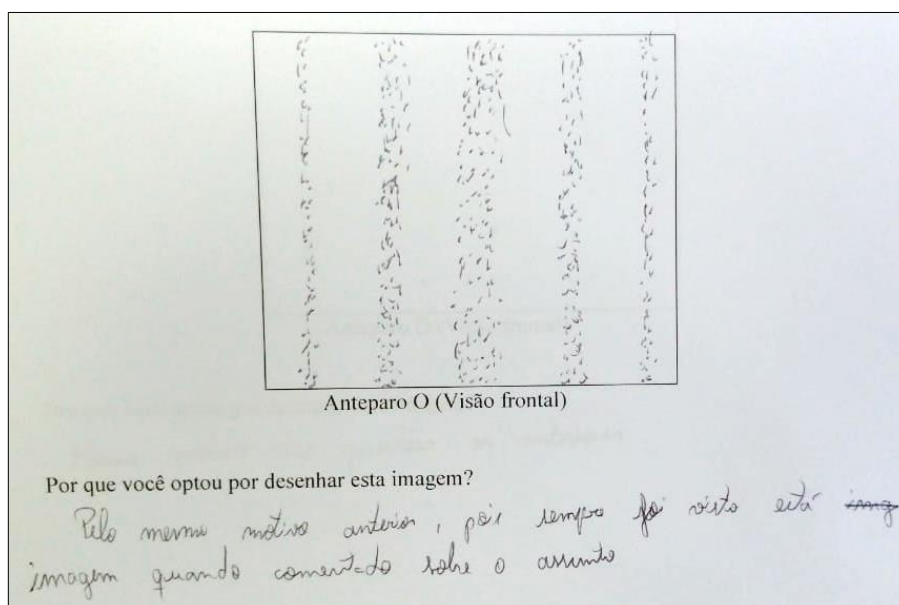
6.3.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais

Consideramos um regime quântico do experimento da dupla fenda quando a fonte está regulada para emitir elétrons individuais, isto é, um segundo elétron só é emitido após o primeiro ter atingido o anteparo. Essa configuração do arranjo experimental estava presente nos testes e foi simulada pelos alunos no experimento virtual.

Inicialmente, verificamos a previsibilidade do aluno AB9 para os resultados formados no anteparo. Para essa configuração da dupla fenda, novamente, o estudante acertou em todos

os testes a ocorrência do padrão de interferência. Como a dupla fenda em regime quântico não é geralmente um tópico estudado em disciplinas anteriores, destacamos abaixo, na figura 55, a resposta dada ao teste I, já que ele é resolvido antes de qualquer contato com o conteúdo dentro do estudo.

Figura 54 - Ilustração e justificativa descritiva do aluno AB9 no Teste I para explicar a ocorrência da interferência.



Fonte: A pesquisa.

Pela resposta descritiva, o aluno demonstrou um condicionamento à reprodução da imagem com as franjas claras e escuras, tendo em vista a não justificativa conceitual do fenômeno, apenas afirmando ser este o seu padrão mais familiar.

No primeiro momento do *report aloud*, quando o aluno foi instigado a reproduzir em voz alta seu raciocínio utilizado para a resolução desta questão nos testes I e II, ele reportou a seguinte concepção acerca do comportamento do elétron ao longo do experimento:

Pesquisador: Como você imagina o elétron saindo da fonte?

AB9: Eu imagino ele saindo em linha reta (Fig. 56-I) ... como um corpúsculo (Fig. 56-II) ... bem pontual.

Pesquisador: Ele [elétron] chega na frente das duas fendas, e o que acontece?

AB9: Ou ele [elétron] passa por uma fenda ou por outra.

Pesquisador: E por que acontece o padrão de interferência?

AB9: Eu não sei.

Figura 55 – (I) Mão direita em movimento frontal para representar a trajetória do elétron. (II) Representação esférica com o polegar e indicador para representar um corpúsculo.



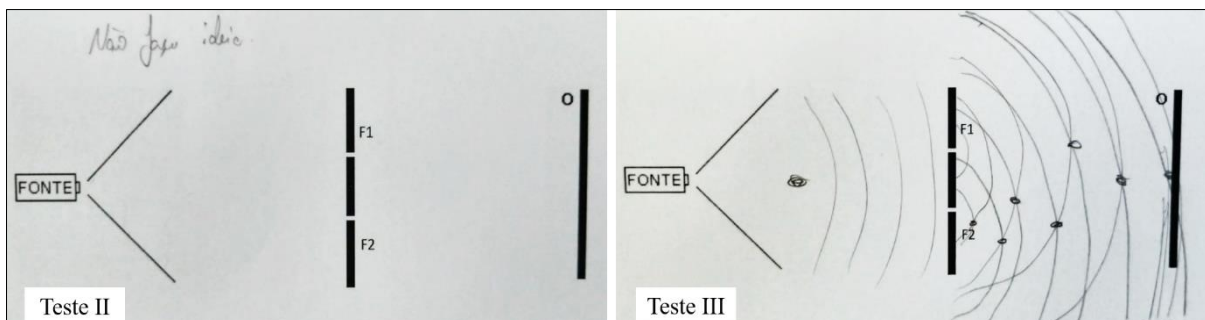
Fonte: A pesquisa.

Nesse momento, o aluno tinha a representação mental do elétron como sendo um corpúsculo pontual, no entanto, optou pela resposta característica de um fenômeno ondulatório justificando com a seguinte afirmação, “*é o que foi visto em aula [atividades com as simulações computacionais³¹]*”. Nesta etapa, o licenciando respondeu corretamente, mas de maneira puramente mecânica, tendo em vista a inconsistência conceitual explicitada em seu discurso verbal e gestual. Podemos ressaltar o que já fora observado em estudos anteriores (TREVISAN; SERRANO, 2016b; TREVISAN; SERRANO, 2018) que a bancada virtual apresenta os resultados possíveis, mas não fornece possibilidades de representações que auxiliem o estudante a preencher importantes lacunas conceituais, tanto em termos ontológicos quanto epistemológicos. Devido a isso, surge a necessidade das instruções didáticas mediadas essencialmente pelos *storyboards*.

Após a interação com os *storyboards*, o aluno AB9 respondeu ao teste III. Como já observado no teste I (Fig.55), a resposta de interferência também está correta. No entanto, as representações mentais e *drivers* externalizados na explicação adotada no segundo momento do *report aloud* difere expressivamente da anterior. A figura 57 compara os desenhos realizados no Teste II e no Teste III para esquematizar a trajetória do elétron ao longo do *setup* experimental.

³¹ Etapa II do estudo, ver seção 5.5.

Figura 56 - Ilustração do aluno AB9 nos Testes II e III para representar o comportamento do elétron ao longo do experimento.



Fonte: A pesquisa.

Antes da mediação com os *storyboards*, o aluno AB9 não soube esquematizar o comportamento do elétron, já no teste III, a ilustração se aproximou da utilizada na seção anterior, e que remeteu à perspectiva da interpretação Dualista Realista.

No *report aloud*, o aluno esclareceu a opção pelo resultado de interferência, “já no simulador nós vimos que dá esse resultado, e pela resposta anterior, a associação da partícula com a onda” (AB9). O excerto a seguir exhibe a argumentação adotada pelo estudante ao explicar o comportamento do elétron nesta configuração experimental.

AB9: Imagino uma bolinha saindo da fonte (Fig 58 – I), seguindo uma trajetória (Fig 58 – II), que seria definida pela onda [associada], é claro que nós não vamos ver a onda.

Pesquisador: E o elétron chega nas fendas, o que acontece?

AB9: A divisão da onda (Fig. 58 – III), causando a interferência, como se fosse uma onda na água [...] A partícula sempre segue a interferência construtiva das ondas.

Figura 57 - (I) Representação de uma esfera. (II) Mão direita representando a possível trajetória do elétron. (III) Duas frentes de ondas após atravessarem as fendas.



Fonte: A pesquisa.

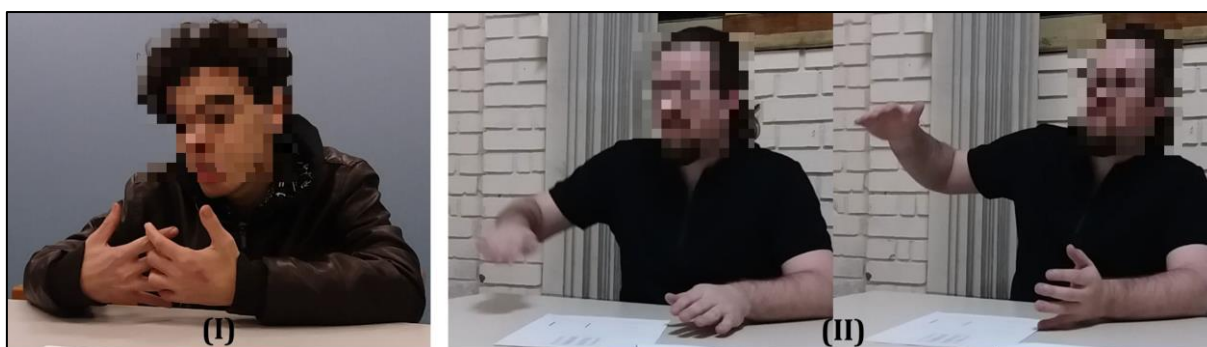
O componente corpuscular do elétron foi indicado na forma esférica e estática concomitantemente a sua menção no diálogo. A onda associada também foi ilustrada gestualmente no exato instante em que foi citada verbalmente, neste caso, a componente ondulatória ganha dinamismo, representando o movimento do objeto quântico. Os gestos

realizados pelo aluno AB9 concordaram com o seu discurso verbal, reforçando a evidência da representação mental utilizada na compreensão do resultado de interferência no anteparo. À vista disso, aproveitamos para ressaltar a conveniência da Análise Gestual Descritiva (MONAGHAN; CLEMENT, 1999; STEPHENS; CLEMENT, 2010), a qual trata a estreita relação entre as imagens mentais e os gestos dos estudantes, considerando estas como indícios concretos de processos cognitivos desenvolvidos pelos sujeitos quando indagados sobre determinadas situações/problemas.

Quanto à inspiração para a construção dessa lógica, o aluno citou explicitamente as instruções didáticas, “*foi da aula, quando a gente viu a Dualista Realista*” (AB9). Novamente, podemos identificar a influência das mediações na construção e articulação das representações mentais e *drivers* no estabelecimento de uma interpretação privada quando se busca a compreensão do fenômeno. Essa interpretação particular, a exemplo da revelada no arranjo experimental anterior, coincide com as conjecturas da interpretação Dualista Realista.

Corroborando com a mesma linha de raciocínio, o aluno AA3 afirmou imaginar o elétron como uma partícula com onda associada, sendo que o padrão de interferência surge, pois, “*a onda se divide entre as duas fendas e o elétron (partícula) passa por uma só. Essa divisão (das ondas) cria as interferências (Fig 59 – I), onde o elétron não é permitido*” (AA3). Essa representação e o comportamento do elétron também foi expressa pelo licenciando AB11, “*o elétron segue as interferências construtivas das ondas (Fig 59 – II)*” (AB11).

Figura 59 – (I) Duas mãos entrelaçadas representando a superposição das ondas. (II) Movimento oscilatório com uma das mãos, indicando o caminho do elétron.



Fonte: A pesquisa.

Em ambas as imagens, os gestos realizados estabeleceram uma relação direta com a linguagem verbal dos estudantes, esclarecendo a externalização das representações mentais empregadas em seu raciocínio. Na Fig. 59-I, percebe-se a interferência projetada pelo aluno, na qual aparenta ser a soma de ondas circulares em movimento frontal. Já na Fig 59-II, o estudante AB11 representou o movimento oscilatório para o elétron que percorre os pontos de máximo e

mínimo da interferência das ondas, assim, assemelha-se ao movimento senoidal, e oferece outros detalhes de como imaginou o movimento do elétron e a interferência ondulatória. Essas caracterizações reveladas pelos gestos, por exemplo, em diversas situações não conseguem ser acessadas apenas com o discurso verbal. Acentua-se a importância de que essas minúcias conceituais são de grande valia na análise das representações mentais e *drivers* utilizados pelos licenciandos na resolução dos problemas.

O aluno AB12 também imaginou o objeto quântico com ondas circulares associadas, que “*guiam*” a partícula (Fig 60 – I). Em seguida, fez uma analogia ao afirmar que o comparou com “*uma galáxia em miniatura, um monte de poeirinha*” (Fig 60 – III) (AB12). No entanto, diferiu a sua explicação em termos do comportamento do elétron, na sua concepção, tanto a onda associada quanto a partícula se dividem nas duas fendas.

Figura 60 – (I) Sequência de fotos para representar o elétron: indicador e polegar para representar um corpo pontual e em seguida os dois indicadores oscilando para representar a onda. (II) As duas mãos oscilando esféricamente para representar a analogia da galáxia.



Fonte: A pesquisa.

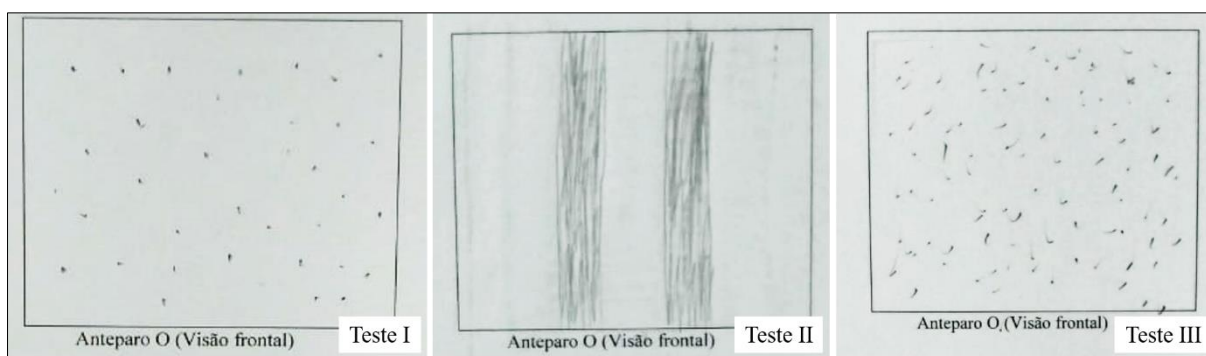
Os gestos realizados são importantes auxiliares na identificação das representações mentais do licenciando AB12, que considerou o elétron composto por um corpo pontual, possível de ser observado com a primeira imagem da Fig 60-I, sendo que a sequência da representação descreve o componente ondulatória do objeto quântico, com o indicador da mão direita em movimento vertical formando semicírculos em frente ao indicador da mão esquerda, estático, representando o corpo pontual. Na Fig 60-II ocorre a imitação da metáfora utilizada com as duas mãos espalmadas aparentemente envolvendo um corpo central que indica a sua noção acerca do elétron.

Sendo assim, diante dessas explicações, novamente pode-se perceber que as representações mentais utilizadas pelos estudantes se assemelham às ilustrações dos *storyboards*, desta forma, podemos inferir a influência dessa ferramenta no complemento às bancadas virtuais para preencher as lacunas interpretativas não abarcadas explicitamente pelos *softwares*.

6.3.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.

Nesta configuração experimental, a fonte permanece emitindo elétrons individuais, mas agora há a presença de um detector/observador, que fornece informações sobre a posição do elétron ao passar pelas fendas. Essa configuração do arranjo experimental estava presente nos testes e foi simulada pelos alunos no experimento virtual. Nos três testes, o aluno AB9 previu corretamente a não ocorrência do padrão de interferência, a figura 61 compara os desenhos nos anteparos.

Figura 61 – Respostas de “não interferência” ilustradas pelo aluno AB9 em todos os testes.

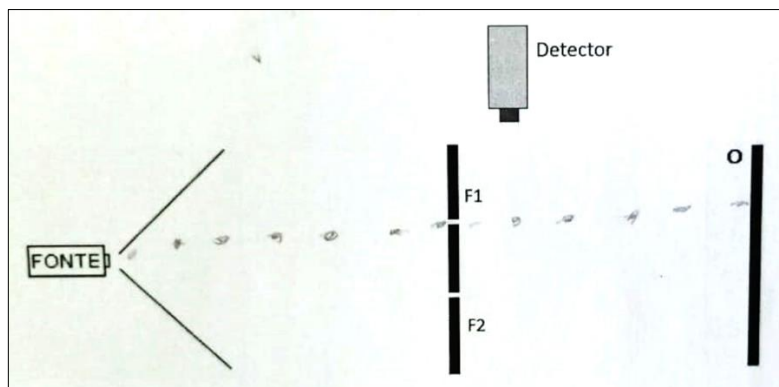


Fonte: A pesquisa.

Como justificativa para os resultados dos testes I e II, no primeiro momento do *Report Aloud*, o aluno AB9 afirmou ter ouvido em algum momento de seu percurso acadêmico o fato de que “*quando tentar observar, ele [elétron] vai se comportar como corpúsculo*” (AB9). No entanto, quando solicitado a informar em que momento ocorreu a assimilação dessa informação, o aluno não sabia precisar “*eu tenho certeza que ouvi em algum lugar, mas não sei aonde*” (AB9). Para a resolução do teste II, o estudante também mencionou o contato com a simulação “*aqui [apontando para o teste II], claro, já teve a simulação anteriormente*” (AB9), para reforçar a informação já adquirida quanto ao ato de observar e, conseqüentemente, o padrão formado no anteparo se modificar.

Solicitado a expor sua representação mental para o elétron saindo da fonte, o aluno apontou para a ilustração no teste II (Fig. 62) e falou “*é um corpúsculo*” (AB9). Em seguida, questionado a buscar uma explicação para o motivo da presença do detector originar um padrão de não interferência como resultado do experimento, o aluno respondeu “*não sei, não sei o motivo*” (AB9).

Figura 62 - Ilustração do aluno AB9 no Testes II para representar o comportamento corpuscular do elétron ao longo do experimento.

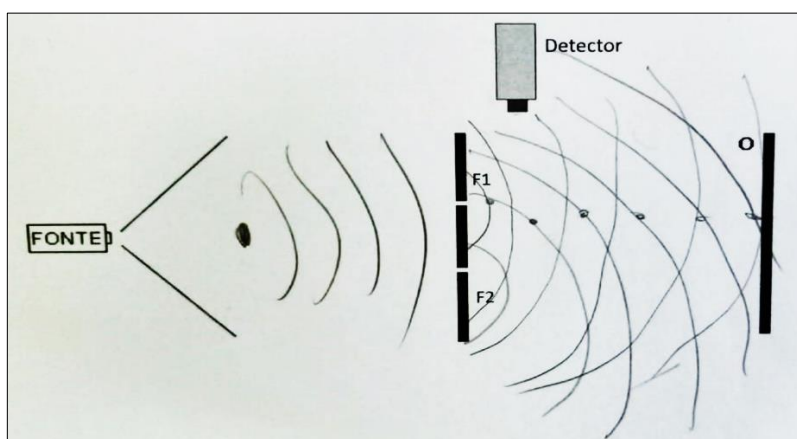


Fonte: A pesquisa.

Portanto, podemos inferir que as respostas corretas em ambos os testes foram de certa forma mecanizadas devido ao apego a uma informação, uma espécie de jargão, incorporado pela sua memória e por meio das atividades com a bancada virtual, que possibilitaram a verificação instantânea dos resultados para cada configuração experimental. Aqui, podemos generalizar ao fazer uma comparação hipotética com testes avaliativos em cursos introdutórios da MQ, que possam aferir o conhecimento do aluno levando em consideração apenas o resultado final. Neste caso, o licenciando alcançaria uma resposta satisfatória mesmo sem possuir uma carga conceitual que pudesse justificar a sua tomada de decisão.

Dando sequência à análise, verificamos a resolução dessa mesma questão no Teste III, aplicado após as instruções didáticas com os *storyboards*. Ainda que o resultado no anteparo tenha sido o mesmo, observamos uma ilustração completamente diferente (ao da Fig. 62) realizada pelo aluno AB9, como mostra a figura 63.

Figura 58 - Ilustração do aluno AB9 no Teste III para representar o comportamento do elétron ao longo do experimento.



Fonte: A pesquisa.

Percebemos que o aluno, neste caso, também alterou suas representações mentais e *drivers* iniciais (observadas no primeiro momento do *report aloud*) para as que dialogam com visão dualista realista. Neste momento, o aluno conseguiu elaborar uma ilustração que explicasse a não ocorrência do padrão de interferência. Isso se deveu, sobretudo, à influência dos *storyboards* na contribuição da construção particular do estudante para explicar o resultado experimental.

Essa conduta interpretativa é revelada com os seguintes trechos extraídos do segundo momento do *Report Aloud*, no qual o estudante iniciou mencionando que “*a onda já não vai formar aquele padrão de interferência bonitinho* (Fig. 64-I)... *No instante que tu vais fazer a detecção, vai mudar o momentum da partícula*” o aluno ainda elaborou uma analogia com um carro de Fórmula 1 seguindo sua trajetória e de repente “*um outro carro choca com ele* (Fig. 64-II), *ela não vai conseguir manter a mesma trajetória*”, e quanto às ondas associadas, elas são alteradas “*porque se ela está associada com o elétron (partícula), a onda vai se modificando* (Fig. 64-III)”.

Figura 59 - (I) Sinalização de franjas claras para representar um padrão de interferência. (II) Duas mãos em contato para representar uma colisão. (III) Distanciamento das mãos espalmadas para representar a modificação da onda associada ao elétron.



Fonte: A pesquisa.

Mediante a análise sobre a linguagem gestual, substanciam-se as evidências das representações mentais utilizadas pelo Aluno AB9 durante a sua compreensão e explicação para o comportamento do elétron neste arranjo experimental. A sinalização da alteração do *momentum* do elétron coincidiu com o seu discurso verbal, isto é, no instante em que o aluno utilizou a analogia de uma colisão automobilística para exemplificar tal interação, o gesto foi realizado, e, como consequência dessa influência, ocorreu a perturbação da onda associada, também ilustrada gestualmente.

Neste sentido, o licenciando AB12, outro exemplo de adoção da alteração do momento da partícula durante a ação do detector, mencionou “*o observador acaba alterando o momento dessa partícula...*” (AB12), a justificativa da sua afirmação ocorreu com a referência direta ao princípio da incerteza “*eu penso na situação do princípio da incerteza que provavelmente para*

localizar, ele (detector) vai jogar alguma onda e assim acabar alterando o momento da partícula” (AB12), sendo que esta alteração afetou diretamente o padrão no anteparo tendo em vista que *“eles (ondas associadas e corpúsculo) não vão ficar, digamos em fase, não existirão caminhos prioritários para ele (corpúsculo) seguir, daí ele acaba fazendo esse espalhamento mais aleatório”* (Fig. 65) (AB12).

Figura 60 – Movimento de ambas as mãos para representar a perturbação da onda associada e o percurso aleatório do corpúsculo até tocar no anteparo.



Fonte: A pesquisa.

Os alunos AB10 e AB15 também continuaram imaginando uma partícula com onda associada ao longo do *setup* experimental, no entanto, não mencionaram justificativas para o resultado no anteparo, apenas reportaram que o detector interagiu de alguma forma durante o experimento, o que ocasionou a não formação do padrão de interferência. Por exemplo, o aluno AB10 reconheceu a não formação do padrão de interferência, *“o detector tira aquele padrão, e aí ele (elétron) tem um comportamento bem aleatório, chegando em qualquer ponto do anteparo”* (AB10), mas, ao ser indagado quanto à atuação do detector e alternância do resultado no anteparo, declarou *“isso eu não saberia dizer, só peguei mesmo aquela questão de perder o padrão com o observador”* (AB10), uma projeção semelhante foi adotada pela estudante AB15, *“nós conseguimos ver por onde ele (elétron) está passando”* (AB15), por isso a não formação das franjas de interferência, já para a imaginação da interação do detector, vai um pouco além e acredita que o detector *“emite ondas luminosas que acabam atrapalhando o caminho (do elétron)”* (AB15) e de alguma forma a interferência não apareça.

Retornando à análise do aluno representativo AB9, evidencia-se a origem dessas representações mentais e *drivers* articulados no momento da compreensão do problema quando destacamos a seguinte fala, ao ser indagado sobre a inspiração para suas explicações: *“eu lembrei da aula, da aula de dualista realista”* (AB9). Essa passagem ressalta a importância das ilustrações representativas e da abordagem conceitual presente nos *storyboards* utilizados

durante as instruções didáticas acerca da dualidade onda-partícula no experimento da dupla fenda.

Na sequência, apresentaremos os resultados expressos pelo aluno AB9 para as configurações experimentais do IMZ.

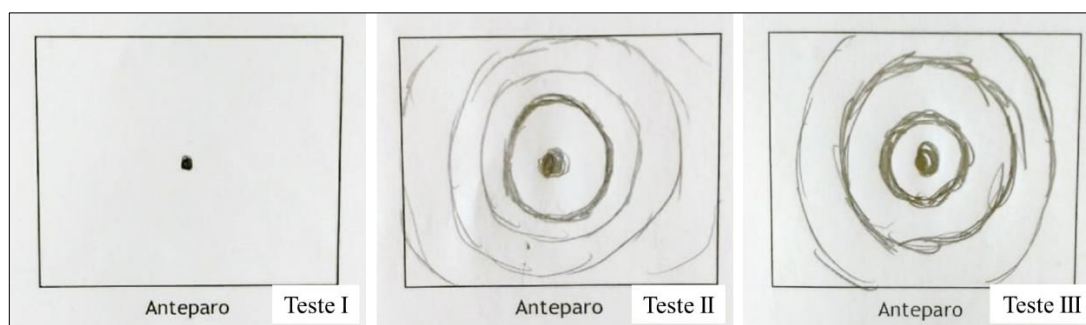
6.3.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.

Neste momento, convém lembrar que o arranjo experimental virtual do IMZ não foi abordado nos *storyboards* pelo fato de o experimento ser considerado conceitualmente análogo ao da dupla fenda. Sendo assim, esperamos verificar se os licenciandos em física desenvolvem espontaneamente o processo de modelização científica dentro dos aspectos Bungeanos quando levados a reportar a sua compreensão para os resultados do IMZ. Essa modelização tende a ser construída a partir da interação com as bancadas virtuais e principalmente com as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*.

Para este caso, consideramos o regime clássico do IMZ quando a fonte está regulada para emitir um “Laser” (indicado no *software*). Essa configuração foi abordada na bancada virtual e esteve presente em todos os testes propostos. Como já observado no movimento da análise, as questões iniciais de cada situação remetem à previsibilidade do padrão formado no anteparo de observação, seguidas das explicações expressas pelos estudantes, tanto na discursiva dos testes quanto no diálogo estabelecido no *report aloud*.

Nesta situação, o aluno AB9 acertou a ocorrência do padrão de interferência nos testes II e III. No teste I, a previsão não foi correta, não houve a descrição da interferência. A figura 66, a seguir, compara os resultados ilustrados nos testes.

Figura 61 – Comparação das respostas ilustradas pelo aluno AB9 em todos os testes.



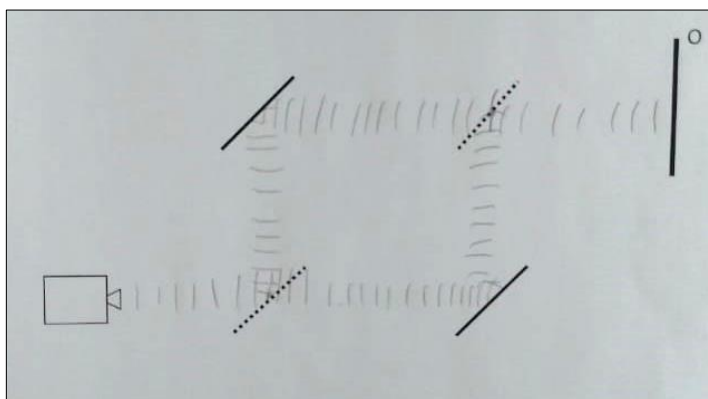
Fonte: A pesquisa.

No primeiro momento do *report aloud*, o estudante AB9 buscou justificar os resultados dos testes I e II. Para o resultado de não interferência (teste I), o aluno afirmou não saber o

motivo de ter desenhado tal figura, “*na verdade eu não lembro o porquê... porque não há interferência... é isso, eu achei que não houvesse interferência*” (AB9), este resultado e a dificuldade de interpretá-lo deveu-se ao desconhecimento do IMZ, o licenciando afirmou já ter observado o arranjo experimental, mas nunca tê-lo estudado de fato. E quanto à imagem do teste II, resolvido após a atividade com a bancada virtual, ela foi remetida ao que fora observado na simulação “*esse [resultado] foi depois da simulação*” (AB9).

Para compreender e explicar o laser ao longo do IMZ, o aluno afirmou ter construído sua concepção a partir do resultado. Logo, como a interferência referiu-se ao comportamento ondulatório, o laser foi representado por frentes de ondas semicirculares, vistos na figura 67, a seguir.

Figura 67 - Ilustração do aluno AB9 no Teste II para representar o comportamento do laser ao longo do IMZ.



Fonte: A pesquisa.

No *report aloud*, o aluno AB9 descreveu a sua compreensão para o caminho seguido pelo laser desde a fonte emissora até o anteparo de observação. O excerto destacado contém as representações mentais e *drivers* utilizados no processo de entendimento e resolução do problema:

Pesquisador: Como tu imaginas o laser saindo da fonte?

AB9: Exatamente como se fosse um laser, assim... (Fig 68-I)

Pesquisador: E quando chega no primeiro espelho semirrefletor?

AB9: Ele vai se dividir né?! Metade vai passar para lá e a outra metade para cá. (Fig 68-II)

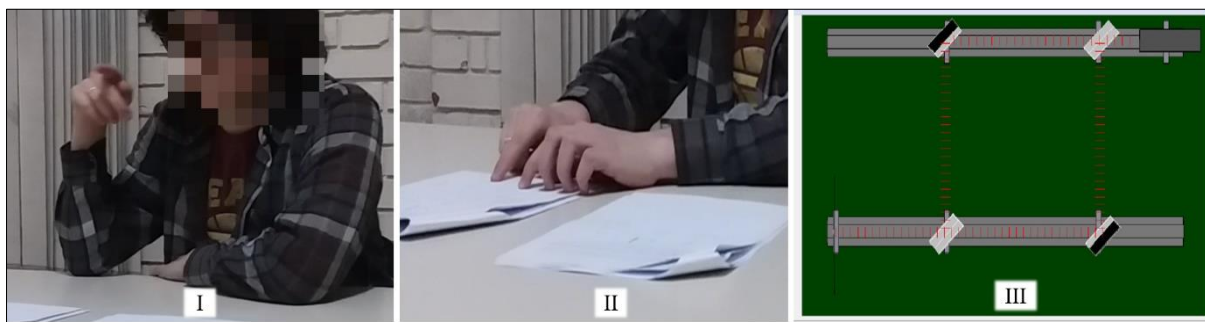
Pesquisador: E quando chega no segundo espelho semirrefletor?

AB9: Ele vai se unir de novo.

Pesquisador: E o que acontece aqui [anteparo] para ocasionar esse padrão?

AB9: Acontece a interferência. Mas como acontece, aí é uma pergunta complexa.

Figura 68 – (I) Dedo indicador em movimento frontal, representando um feixe de laser. (II) Sinalizando no plano do teste a divisão do laser no espelho semirrefletor. (III) Representação do “way of rays” fornecida pelo software.



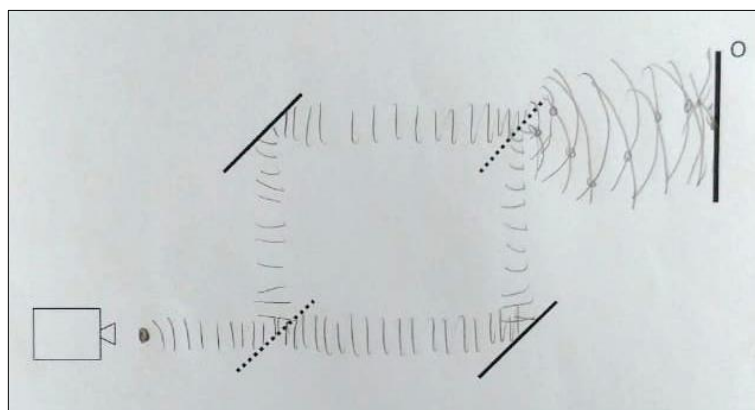
Fonte: A pesquisa.

No que tange a orientação para o raciocínio apresentado, a simulação foi mencionada tanto para a imagem do resultado, quanto para a possibilidade de divisão do laser emitido pela fonte ao passar pelos espelhos semirrefletores (Fig. 68-III).

Até este momento, no qual o principal mecanismo de mediação e fonte teórica para o estudo do fenômeno eram as bancadas virtuais, o aluno AB9 inclinou-se a uma interpretação essencialmente ondulatória e analisou o IMZ em regime clássico com representações mentais e *drivers* de origem hipercultural (provenientes dos *softwares*) que caracterizam o comportamento de onda para o laser.

Analisando as possíveis mudanças conceituais em termos ontológicos e epistemológicos, após as instruções didáticas com os *storyboards*, notou-se ainda na ilustração do *setup* experimental a mudança na representação do laser, no qual foram acrescentadas pequenas esferas às ondas semicirculares (Fig. 69)

Figura 69 - Ilustração do aluno AB9 no Teste III para representar o comportamento do laser ao longo do IMZ.



Fonte: A pesquisa.

E, no segundo momento do *report aloud*, o aluno AB9 justificou a escolha pelo padrão de interferência como resposta devido à lembrança da simulação “o resultado veio da simulação” (AB9), e enfatizou que antes ele pensou na resposta e depois buscou uma explicação

para o comportamento do laser que possibilitasse a ocorrência das franjas claras e escuras. A descrição do laser durante o percurso entre a fonte e o anteparo, realizada pelo aluno, está contida no seguinte excerto:

AB9: É um feixe de luz né? Eu representei, uma partícula. No caso do feixe, eu imagino que sejam várias partículas. Então eu fiz a representação de uma só, que serve para todas. Sai o feixe de luz, já tem todo o caminho da onda, a propagação dela [semicircular]. E aqui [apontando para o segundo espelho semirrefletor] acontece a interferência, e os fótons vão seguir as interferências construtivas, chegando no anteparo.

Pesquisador: E por isso que ele chega em um ponto e não em outro?

AB9: Exato, ele não fica entre as duas faixas.

Pesquisador: Aqui no espelho semirrefletor você desenhou que a onda se dividiu, e o que acontece com a partícula?

AB9: Ou ela é refletida ou ela é refratada.

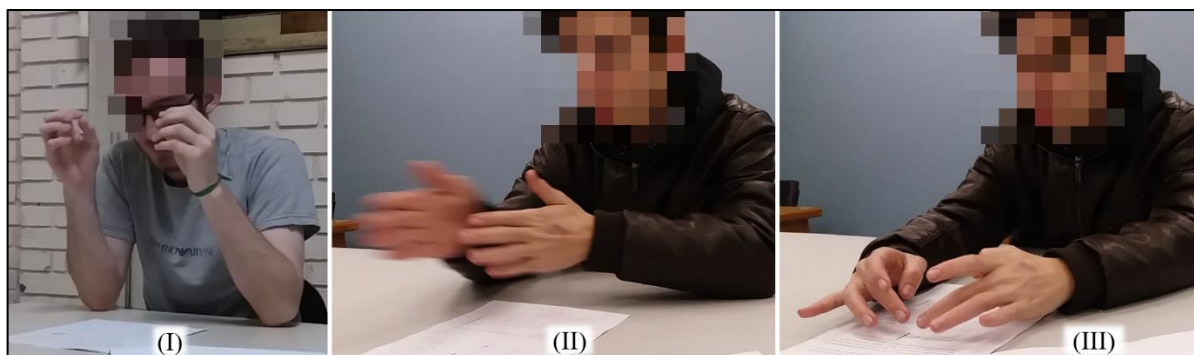
A explicação reportada pelo aluno evidenciou a utilização das representações mentais e *drivers* semelhantes às empregadas na resolução e compreensão da dupla fenda. O licenciando utilizou esses mecanismos na sua modelização científica para interpretar e satisfazer o resultado previsto no anteparo. As ilustrações representativas nos *storyboards*, mesmo que direcionadas à dupla fenda, forneceram subsídios teóricos para que o estudante se estabelecesse, ainda que de forma incipiente, na interpretação dualista realista. Haja visto os elementos mencionados, como a porção ondulatória e corpuscular do coletivo de fótons, as divisões das ondas associadas com a partícula seguindo os caminhos possíveis de interferência construtiva.

Ainda reforçando a influência das bancadas virtuais seguidas das instruções didáticas, o aluno AB9 deixou claro quanto à origem de inspirações para a sua modelização diante dessa configuração do IMZ, “*eu pensei na questão da dupla fenda, e o resultado [anteparo]”, eu tentei associar os dois e imaginar o que poderia estar acontecendo*” (AB9). Diante dessas evidências, podemos inferir que o conjunto de mediações empregadas nas atividades possibilitaram ao licenciando a apropriação de uma postura ontológica e epistemológica acerca do comportamento dos objetos quânticos, que preencheu, ainda que não em sua totalidade, as lacunas interpretativas presentes no *setup* experimental do IMZ.

Para esta configuração experimental, os alunos AA3 e AB12 seguiram uma linha de raciocínio semelhante, no qual o feixe de luz era composto por múltiplos objetos quânticos definidos como corpúsculos com ondas associadas, “*aqui eu tive o mesmo pensamento da dupla fenda, que vão sair um monte de fótons [corpúsculos] (Fig. 70 - I) com as ondas piloto*” (AB12), logo, o padrão de interferência ocorre devido a interferência das ondas associadas, “*a partícula vai por um dos lados (Fig. 70 – II) e a onda vai para os dois, se divide nos dois... e aqui [segundo*

espelho semirrefletor] *elas se encontram (Fig. 70 – III)... tem a interferência com as diferenças de fase, não deixando a partícula cair em alguns pontos*” (AA3).

Figura 70 – (I) Aluno AB12 representando os fótons que compõem o feixe de luz. (II) Aluno AA3 sinalizando a direção tomada pela porção corpuscular do objeto quântico. (III) Indicação da superposição das componentes das ondas associadas.



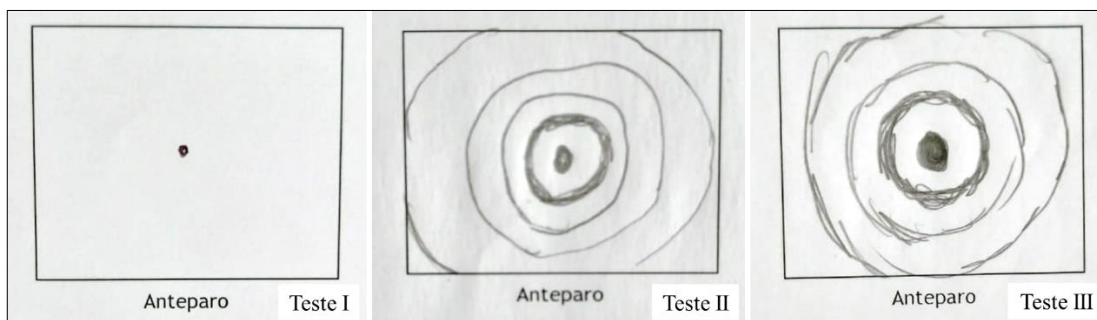
Fonte: A pesquisa.

Os demais licenciandos não empregaram diretamente as conjecturas da interpretação dualista realista para este arranjo experimental, enquanto os alunos AB10 e AB15 justificaram a interferência em termos ondulatórios clássicos para o feixe de luz, os alunos AB11 e AB16 remeteram à ausência de observador no experimento como fator preponderante.

6.3.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.

Para este caso, consideramos o regime clássico do IMZ quando a fonte está regulada para o regime monofotônico, ou seja, emite fótons individuais. Essa configuração foi abordada na bancada virtual e esteve presente em todos os testes propostos. Nesta situação, o aluno AB9 manteve a mesma lógica da configuração experimental anterior, indicando nos anteparos dos testes II e III o padrão de interferência e para o anteparo do teste I, apenas um ponto circular centralizado, o que caracteriza a não formação das franjas claras e escuras. As três respostas estão exibidas na figura 71 abaixo.

Figura 71 - Comparação das respostas ilustradas pelo aluno AB9 para o IMZ em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

Justificando as respostas dos testes I e II, durante o primeiro momento do *report aloud*, o aluno AB9 afirmou para o teste I ter seguido a mesma resposta da questão anterior, na qual a fonte emitia um laser, pois não tinha ideia do que poderia acontecer. Para o padrão de interferência do teste II, o aluno afirmou ter lembrado da bancada virtual, isto é, da imagem fornecida pela simulação, “*o resultado eu lembrei da simulação... eu sabia que tinha que dar uma interferência*” (AB9). Inicialmente, ao ser questionado quanto ao comportamento do fóton no IMZ, o aluno passou, despropositadamente, a descrever a sua imagem do elétron para o experimento, ele explicou:

AB9: Ele [elétron] vai sair corpuscular, ou ele vai passar ou ele vai refletir.

Pesquisador: Você não acha que ele se divide?

AB9: Não.

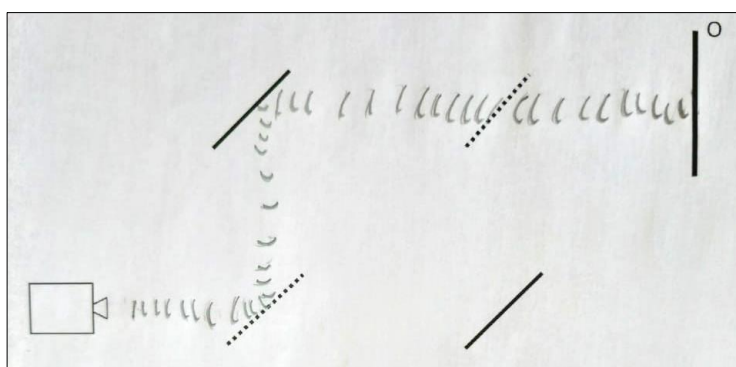
AB9: E depois [segundo espelho semirrefletor], ele vai refletir ou... aqui eu fiquei na dúvida, ele pode refletir de novo aqui.

Pesquisador: E por que você acha que acontece este padrão [interferência]?

AB9: Não sei te dizer.

E quando o aluno foi conduzido a imaginar a mesma situação para o elétron, ele percebeu que a sua explicação anterior já estava direcionada ao próprio elétron “*ah, tá, aqui é fóton, eu estava pensando no elétron*” e ainda completou “*agora faz sentido [apontando para a sua ilustração do teste II (Fig. 72)]*” (AB9).

Figura 72 - Ilustração do aluno AB9 no Teste II para representar o comportamento de um fóton ao longo do IMZ.



Fonte: A pesquisa.

A ilustração indica a aproximação de uma onda circular, que no momento representava a imaginação do estudante para o objeto quântico, essa representação mental é comprovada de fato pelo aluno no seguinte excerto:

Pesquisador: E por que você representou o fóton desse jeito?

AB9: Exatamente por eu imaginar o fóton como uma onda e não como um corpúsculo.

Pesquisador: E tu acha que mesmo assim ele não se divide? [apontando para a ilustração do teste II, feita pelo aluno].

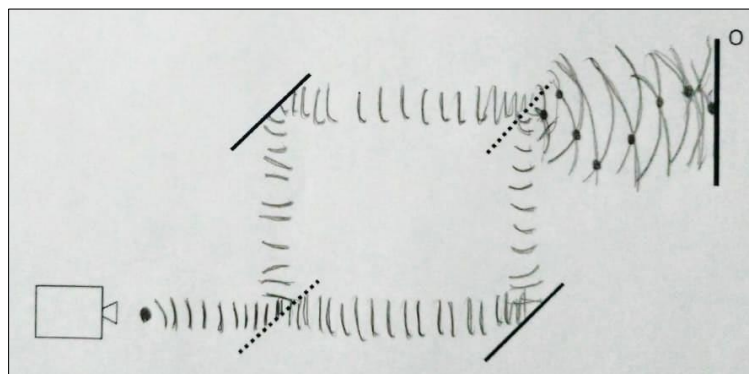
AB9: É, mesmo assim ele não vai se dividir. E aí pode ser pelo conceito de *quantum*, que são pacotes de energia, não tem como dividir meio *quantum*.

Nessa situação, o aluno demonstrou um determinado conflito entre suas representações mentais e *drivers*, embora atribuiu característica ondulatória ao fóton, ele não o interpretou dividindo nos espelhos semirrefletores. Essa discordância contribuiu para a sua menção a não compreensão da ocorrência do padrão de interferência. E quanto à referência ao termo *quantum*, sua origem advém de uma mediação cultural “*eu li em Uma Breve História do Tempo*³² ... *não sei se me ajudou ou atrapalhou, mas lembrei dele [livro]*” (AB9).

Antes de participar das instruções didáticas, podemos identificar uma postura predominantemente corpuscular do aluno AB9, ainda que atribua uma forma ondulatória para o fóton, ele acaba analisando no experimento em termos corpusculares a exemplo do elétron. As mediações que prevalecem são as advindas dos *softwares* e de conceitos do livro recordado. Apesar da previsão correta para a interferência no teste II, o licenciando não conseguiu construir uma explicação que justificasse esse resultado, o que novamente nos evidencia a lacuna representacional e conceitual deixada pelas bancadas virtuais.

Logo após o estudo com os *storyboards* o aluno AB9, ao responder essa mesma questão presente no teste III, manteve o mesmo padrão de interferência (Fig. 73-III), no entanto, a explicação para o resultado se modificou expressivamente. Para a construção da sua resposta, o aluno relatou suas principais influências, “*por causa da simulação eu lembrava que ia acontecer isso [interferência], e aqui também, eu associei a simulação com o que nós tínhamos visto na dupla fenda e imaginei que aconteceria isso*” (AB9). O aluno estava se referindo a sua ilustração para o comportamento do fóton no caminho do IMZ, vista a seguir, na Fig. 73.

Figura 73 - Ilustração do aluno AB9 no Teste III para representar o comportamento de um fóton ao longo do IMZ.



Fonte: A pesquisa.

³² “Uma Breve História do Tempo: do Big Bang aos Buracos Negros” é um livro de divulgação científica escrito pelo físico teórico e cosmólogo britânico Stephen Hawking, sua primeira edição foi publicada em 1988.

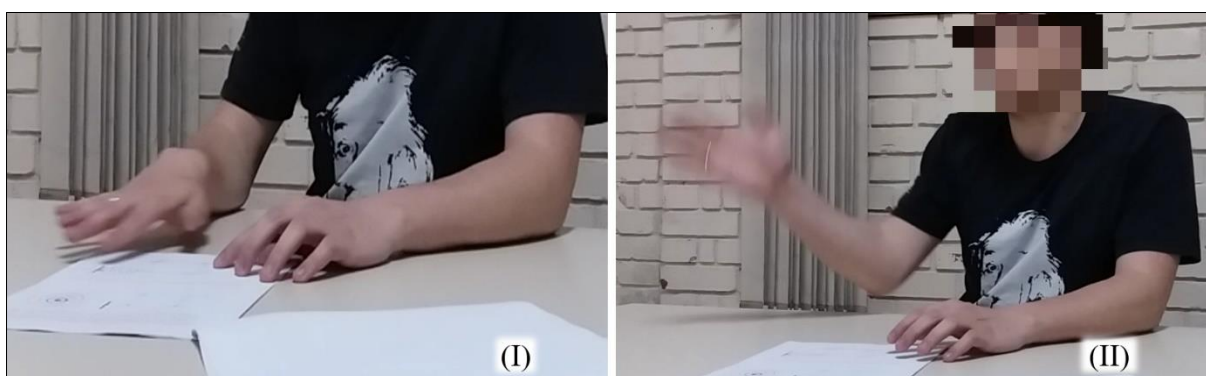
No *report aloud*, o licenciando descreveu o fóton como uma partícula com uma onda associada, explicação equivalente à revelada para o arranjo anterior com a fonte que emite um laser. O excerto que expressa a ideia do estudante é o seguinte:

AB9: O fóton estaria saindo do emissor com a sua onda já definida (Fig. 74-I) e depois que ele passa pelo último espelho semirrefletor ele gera a interferência e aí o fóton vai seguir o caminho da onda construtiva (Fig. 74-II).

Pesquisador: E se fosse o elétron?

AB9: Igual, eu ia representar igual.

Figura 74 – (I) Mão direita espalmada para representar a onda associada espalhada ao longo do IMZ. (II) Mão direita em movimento lateral para simular o movimento do fóton.



Fonte: A pesquisa.

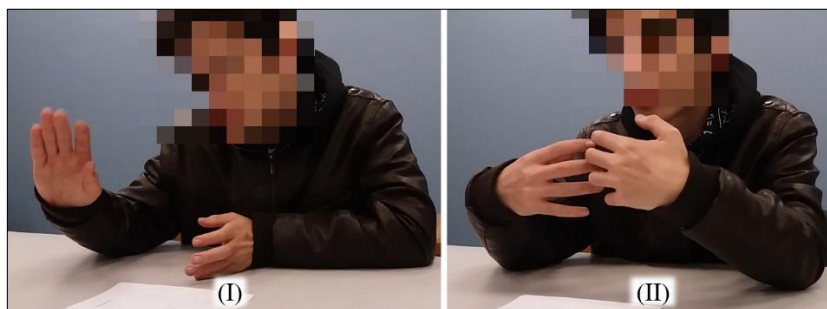
Para reforçar a origem da explicação do licenciando neste cenário do IMZ, fora indagado quanto aos fatores que contribuíram para essa assimilação interpretativa, o estudante respondeu: “*eu sabia o resultado [bancada virtual], eu imaginava e já tinha a experiência da dupla fenda [storyboards] e fiz a associação das duas*” (AB9).

As evidências levantadas manifestaram a modelização realizada pelo aluno AB9, tendo em vista a transposição de suas representações mentais e *drivers* construídos a partir de interações com as bancadas virtuais e sobretudo com os *storyboards* para a compreensão e consequente interpretação privada acerca do resultado do IMZ em regime quântico. Deste modo, o licenciando descreveu epistemologicamente e ontologicamente o fóton (objeto-modelo) desenvolvendo o seu comportamento sob o ponto de vista dualista realista (modelo teórico).

Um segundo exemplo de modelização construída a partir das proposições direcionadas ao experimento da dupla fenda foi a realizada pelo aluno AA3, na qual mantém a sua compreensão para o comportamento do objeto quântico, explicando o padrão de interferência como consequência da superposição das frentes de ondas associadas ao corpúsculo, nas palavras do estudante “*o corpúsculo segue para um lado [caminho] e a sua onda se divide nos dois (Fig. 75 – I) ... e quando se encontram [no segundo espelho semirrefletor] criam*

interferência (Fig. 75 – II), e a partícula segue ali, só que ela [partícula] só tem determinados caminhos permitidos” (AA3).

Figura 75 – (I) Representação da divisão da onda associada. (II) Indicação da superposição das frentes de onda, ocasionando a interferência.



Fonte: A pesquisa.

Em outros casos, como por exemplo os observados nos raciocínios dos alunos AB11 e AB15, o objeto quântico foi assumido no *setup* experimental como um corpúsculo com uma onda piloto associada, no entanto, nas justificativas para a formação das franjas de interferência, tanto o corpúsculo quanto a onda foram indicados como divisíveis, ou seja, ambos tomaram os dois caminhos após a passagem pelo primeiro espelho semirrefletor, e, em seguida, no segundo espelho, se superporam e formaram o padrão. Essa interpretação foi exemplificada nos seguintes excertos: “*Eu vou manter esse padrão... por mais que eu solte um fóton por vez, ele vai em ondas, eu acabo dividindo um fóton e depois juntando ele... a onda que ele tem, interage com ela mesma*” (AB11). “*O fóton é o objeto luminoso que emite onda luminosa. Essa onda diminui a amplitude, e metade vai por um caminho, a outra metade por outro e aqui [segundo espelho semirrefletor] elas se encontram... a partícula também se divide*” (AB15).

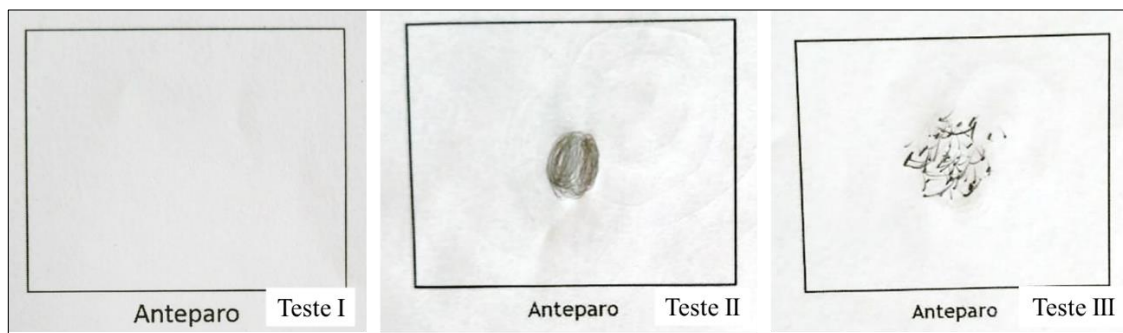
Outro ponto a ser destacado nesta seção atribui-se à influência dos *storyboards* como mecanismo externo de mediação no preenchimento das lacunas representacionais e conceituais geralmente deixadas pelos *softwares*. Os resultados do aluno AB9 reforçam a dimensão da interação conjunta entre as bancadas virtuais e os *storyboards* nas instruções didáticas.

6.3.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.

Nesta situação experimental, a fonte permaneceu em regime monofotônico, mas após houve presença de um detector/observador, que forneceu informações sobre a posição do fóton

pelos caminhos do IMZ. Essa configuração do arranjo experimental esteve presente nos testes e também foi simulada pelos alunos no experimento virtual. As respostas desenhadas no anteparo dos testes II e III indicaram corretamente a não formação de interferência, já no teste I, o aluno não desenhou nenhum resultado e justificou o anteparo em branco com a seguinte frase: “*Não conseguiria representar*”. A Fig. 76 resume as três respostas previstas.

Figura 76 – Respostas do aluno AB9 para o IMZ em regime quântico com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

No primeiro momento do *report aloud*, o aluno justificou as respostas dos testes I e II. Para o anteparo em branco no teste I, não houve justificativa, o estudante simplesmente não sabia o que desenhar no anteparo. Já para a imagem do teste II, o argumento foi construído em cima das suas interações com a simulação computacional e com frases ouvidas e lidas em momentos extra acadêmicos em que tenha ocorrido a memorização de frases como “*quando há observador o fóton/elétron muda seu comportamento*”. O recorte a seguir explicita os pareceres do licenciando:

AB9: Eu imaginei o mesmo que anteriormente [dupla fenda], quando tem observador não há interferência.

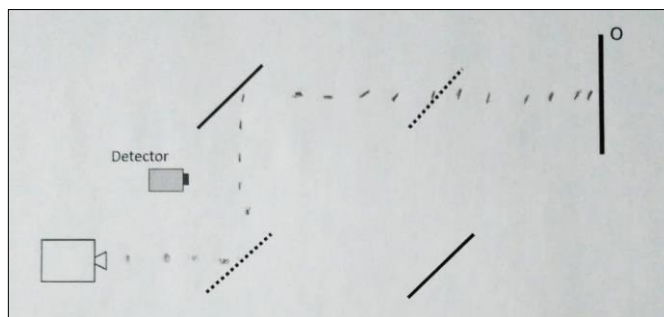
Pesquisador: E por que tu sabe que não tem interferência?

AB9: Acho que a simulação talvez tenha reforçado e foi naquelas frases lá, que não lembro aonde eu vi.

AB9: E pra essa resposta eu até acho que foi mais pelo que eu tinha ouvido do que pela simulação, pela simulação eu não lembrava direito.

E, para a explicação da não formação do padrão, ou seja, a influência do detector no arranjo experimental a ponto de alterar a resposta no anteparo, o licenciando AB9 mencionou não saber o motivo, “*para o fóton eu não tenho ideia*” (AB9). A representação do comportamento do objeto quântico ao longo do experimento, no teste II, é observada abaixo, na Fig. 77.

Figura 77 - Ilustração do aluno AB9 no Teste II para representar o comportamento do laser ao longo do IMZ com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

Neste caso, o aluno manteve a sua representação e permaneceu afirmando na propagação do fóton em pequenos pacotes indivisíveis e o elétron em pequenos corpúsculos também indivisíveis. Como mostra o seguinte excerto:

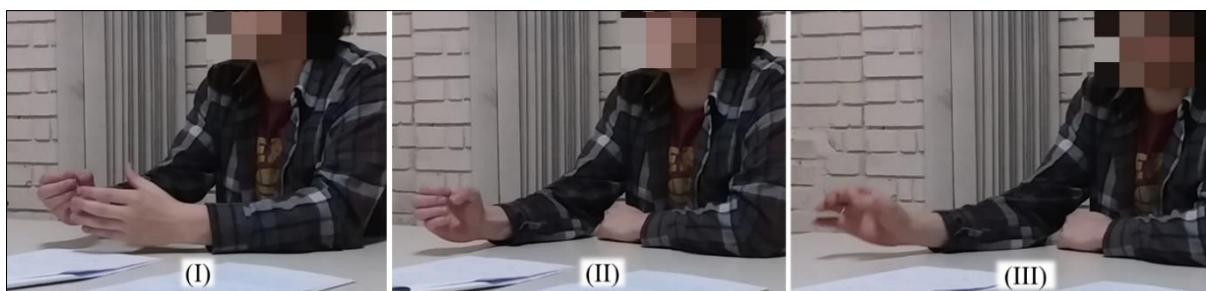
Pesquisador: Sai o fóton da fonte, tu imaginas ele como?

AB9: Eu pensei nesse caso, ele como um pacote de energia (Fig.78 – I), daí eu pensei como se fosse algo estabelecido (Fig. 78 – II) sempre.

Pesquisador: E se fosse um elétron?

AB9: Daí ia ser um corpúsculo, uma esfera (Fig. 78 – III).

Figura 78 – (I) Representação de uma determinada grandeza (pacote de energia) definida pelas duas mãos. (II) Caracterização de uma figura aparentemente esférica para representar uma dimensão definida. (III) Ilustração de uma esfera para simbolizar o elétron.

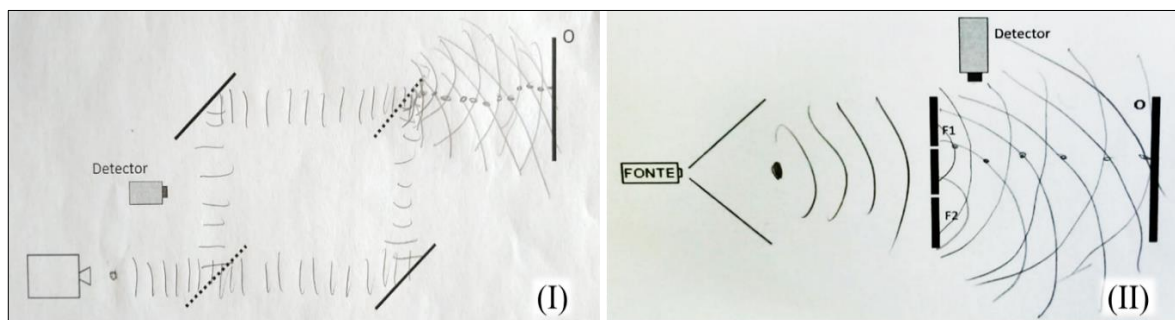


Fonte: A pesquisa.

Os gestos descritivos do aluno AB9 reforçam as representações mentais e *drivers* externalizados pelo discurso verbal, isso nos mostra a ideia estabelecida de indivisibilidade para o objeto quântico. Ao citar o fóton, os gestos remeteram a uma possível representação esférica, indicando que, embora a representação da Fig. 78 não seja esférica, sua imagem mental relacionada a esse objeto quântico tomado como indivisível lembrou uma região delimitada esféricamente. Essa interpretação é semelhante à empregada para o IMZ sem a presença do detector no teste II (antes do estudo com os *storyboards*).

Na resolução do teste III, após as instruções didáticas, o aluno AB9 adotou uma linha representativa diferente da anterior para exibir o comportamento do objeto quântico no IMZ. A Fig. 79 compara as ilustrações realizadas para o experimento da dupla fenda e para o IMZ, ambas no teste III.

Figura 79 – (I) Representação do teste III para o comportamento do fóton no IMZ. (II) Representação do teste III para o comportamento do elétron na dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

Analisando as duas ilustrações, podemos verificar a modelização realizada pelo licenciando AB9, tomando como fundamentação teórica a sua compreensão do experimento da dupla fenda, que, por sua vez, foi construída, sobretudo, a partir das simulações computacionais e *storyboards*. Os traços desenhados denotam ontologicamente os objetos quânticos como corpúsculos com ondas associadas com sua evolução temporal nos experimentos virtuais regida fundamentalmente pelas conjecturas da interpretação Dualista Realista.

Os trechos a seguir, extraídos do segundo momento do *report aloud*, detalham as representações mentais e *drivers* acerca da modelização e compreensão do comportamento do fóton nesta configuração experimental.

Pesquisador: O que tu imaginas saindo da fonte?

AB9: Ele [fóton] sai da fonte, chegou no primeiro espelho semirrefletor, ou ele reflete ou vai seguir a trajetória normal [refratar], e no caso aqui, o detector ia interferir na trajetória dele.

Pesquisador: E como tu achas que o detector influencia na trajetória dele?

AB9: O mesmo que a questão anterior [dupla fenda com detector], ele vai influenciar no momentum do fóton, ou do elétron que seja, pelo fato de ter uma interação (Fig. 80 – I), são partículas da mesma grandeza... ele vai interferir aqui e aí a onda já não, o fóton já não vai mais seguir o caminho estabelecido pela onda (Fig. 80 – II), ele seguiria o caminho da interferência construtiva (Fig. 80 – III), ele vai seguir outros caminhos.

Pesquisador: E quando o detector detecta a partícula, o que tu achas que acontece com a onda dele que já estava aqui [apontando para o segundo espelho semirrefletor]?

AB9: Ela vai mudar também.

Pesquisador: Ela muda instantaneamente?

AB9: Sim.

Figura 80 – (I) Simbolização com os dois punhos de uma interação entre o detector e o fóton no IMZ. (II) Representação de uma região estabelecida pela onda associada ao corpúsculo. (III) Indicação do caminho da interferência construtiva a ser seguido pelo fóton.



Fonte: A pesquisa.

A explicação construída pelo aluno AB9 seguiu com coerência as representações mentais e *drivers* estabelecidos na sua interpretação para o resultado da dupla fenda nas mesmas condições experimentais. Essa congruência conceitual foi sinalizada devido à concordância entre a linguagem verbal e gestual do estudante, que possibilitou identificar a postura dualista realista aderida, na qual o fóton é um corpúsculo com onda associada e que o detector, ao realizar a medida interferiu no *momentum* da partícula e, conseqüentemente, alterou a sua onda associada e as interferências construtivas e os caminhos passíveis para o corpúsculo, acabando assim, com o padrão de interferência no anteparo.

Buscando identificar as mediações que contribuíram para essa compreensão, questionamos as referências imaginadas pelo estudante no momento da resolução do teste III, que revela: “*foi a simulação e a dupla fenda que a gente estudou*” (AB9). Dito isto, demonstrou-se explicitamente a influência das mediações empregadas no estudo para a construção de uma interpretação privada que se estabelece, ainda que de forma embrionária, em um dos quatro grupos interpretativos da MQ, o dualista realista.

Essa concepção de que o detector interage com a porção corpuscular do objeto quântico a ponto de alterar sua onda associada e conseqüentemente desconstruir o padrão de interferência, também foi manifestada, por exemplo, no discurso do aluno AB11, “*a partir do momento que eu desloco ele [corpúsculo], eu mudo esse padrão de onda, então eu não tenho mais... eu não crio mais aquela coisa bonitinha que é uma onda somando a outra com vales e cristas*” (AB11).

Em outro ponto de vista acerca da perturbação do objeto quântico provocada pelo detector, os licenciandos AB12 e AA3 acreditam na alteração direta da onda associada presente na região do detector, “*as ondas que estão à frente da partícula, elas dão uma espécie de aviso que aquele caminho está sendo observado... a metade da onda pelo caminho do detector não continua e a partícula segue a outra metade da onda*” (AB12), outra interação detector-onda

piloto foi descrita da seguinte forma “*a onda associada do fóton é infinita, mesmo quando ele sai da fonte, já tem uma onda no detector, e antes da partícula chegar no detector, ele [detector] já destruiu a onda*” (AA3).

Para os demais licenciandos, o AB10, AB15 e AB16, o objeto quântico no *setup* experimental com detector continuou retratado como um corpúsculo com onda associada, mas a própria influência do detector e a desconstrução do padrão de interferência não foram explicadas, ou seja, estes alunos não conseguiram expressar uma construção conceitual que justificasse a mudança do resultado no anteparo na medida que um detector foi acrescentado no IMZ.

Finalizada a análise dos resultados levantados acerca do grupo interpretativo dualista realista, apresentamos, na sequência, a apreciação dos dados relacionados à aluna representativa chamada de “AA1”, escolhida para representar o grupo de estudantes inclinados à Interpretação Ondulatória (Realista) durante o entendimento e a justificativa dos resultados observados nas diferentes configurações dos experimentos virtuais.

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO ONDULATÓRIO (REALISTA) – A LICENCIANDA AA1 COMO ALUNA REPRESENTATIVA.

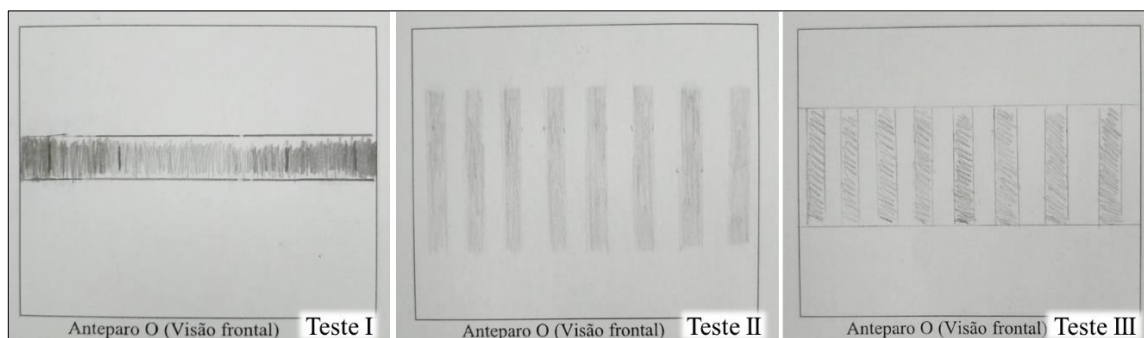
Antes de iniciar a leitura dos dados da licencianda AA1, é oportuno ressaltar que ela foi escolhida para figurar como representante dos indivíduos do estudo em que, na construção das suas explicações para os resultados experimentais, sobressaíram-se aspectos teóricos sustentados pela Interpretação Ondulatória (Realista). A escolha pela acadêmica AA1 aconteceu devido a sua postura ondulatória destacar-se entre os demais, isto é, a tendência ondulatória mostrou-se mais expressiva ao longo da resolução dos testes e dos momentos de *Report Aloud*. Além do mais, reconhecemos outros dois licenciandos com posicionamento semelhante, incluídos neste grupo interpretativo, são eles: AA5 e AA6.

A exemplo do cenário anterior, tomaremos o início da análise com o olhar voltado aos dados associados ao arranjo experimental da dupla fenda.

6.4.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.

A previsibilidade do resultado para esta configuração do experimento é o primeiro ponto a ser explorado. Nos três testes, a aluna AA1 optou pela imagem de interferência. A Fig. 81, a seguir, compara os desenhos realizados no anteparo.

Figura 81 – Respostas da aluna AA1 para a dupla fenda operando com feixe de luz.



Fonte: A pesquisa.

Os três resultados representam um padrão de interferência. Ainda que no teste I, o padrão seja diferente dos demais, foi tomado pela licencianda como franjas claras e escuras, características de uma interferência, haja visto a resposta dissertativa dada para a escolha da ilustração: “*Optei pela interferência, franjas mais escuras nas pontas*” (AA1). E quanto à explicação para a ocorrência desses resultados, destacaremos inicialmente os trechos do primeiro momento do *report aloud*, no qual a aluna externalizou, por linguagem verbal e gestual, a sua compreensão do experimento ao resolver os testes I e II. Lembramos que o teste I foi proposto antes de qualquer atividade do estudo, e o teste II foi aplicado após a interação com as bancadas virtuais.

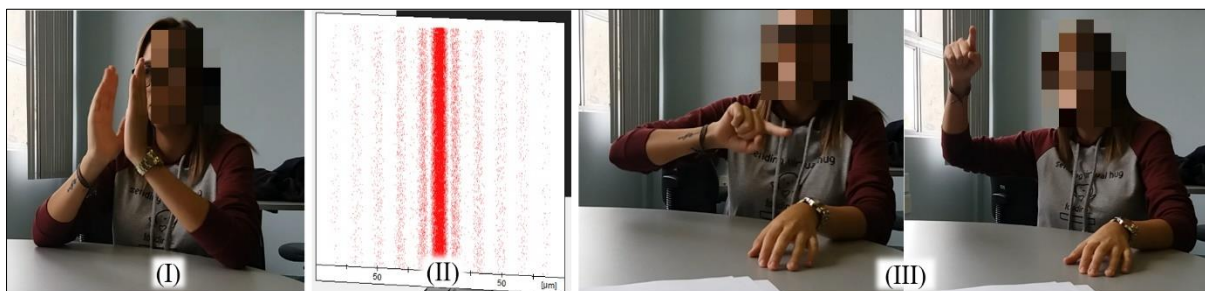
O resultado do teste I, de acordo com a aluna, foi proveniente da lembrança de um gráfico de distribuição visto durante o estudo desta configuração experimental em uma disciplina dedicada aos estudos de óptica e relatividade, que antecedeu a disciplina introdutória de MQ.

AA1: Quando eu fiz o pré-teste [teste I], por exemplo, na aula de óptica e física moderna a gente não viu nenhuma imagem de interferência e nem das linhas de interferência (Fig 82 - I), nós só vimos aquele gráfico, sabe? Que é um gráfico onde começa menorzinho, daí o meio fica maior e depois continua menorzinho (Fig 82 - II), as ondas, a parte construtiva e destrutiva. Então eu não sabia muito o que desenhar, já que não tinha visto um desenho.

Pesquisador: Quando tu estás falando isso, você está imaginando o que?

AA1: A sala de aula, o desenho que o professor fez no quadro [repete os gestos da Fig. 82 - II].

Figura 82 – (I) Representação das franjas de interferência. (II) Imagem da resposta do *software* para a dupla fenda em regime quântico. (III) Sequência de gestos senoidais, variando a amplitude para representar um gráfico de probabilidade da dupla fenda.



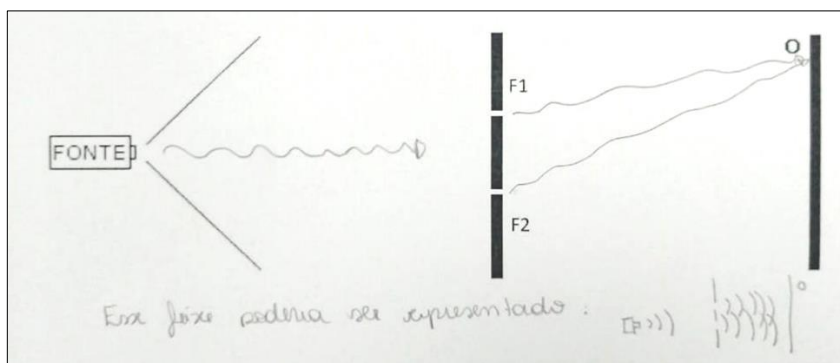
Fonte: A pesquisa.

As linguagens verbal e gestual concordaram entre si e expuseram as representações mentais e os *drivers* oriundos da mediação social e cultural definidas pela situação em sala de aula. A ilustração do teste II indica sua origem da bancada virtual (mediação hipercultural), tendo em vista a semelhança do gesto descritivo (Fig. 82-I), da figura desenhada (Fig. 81 – teste II) e da imagem fornecida pelo *software* (Fig. 82-II), mesmo que o padrão seja para a configuração de elétrons individuais, serviu de inspiração para a construção desse formato de interferência.

A aluna não explicou diretamente a ocorrência da interferência realizada pelo feixe de luz na dupla fenda, mas descreveu conceitualmente o fenômeno de interferência da seguinte forma: “*Interferência é a superposição de duas ou mais ondas no mesmo ponto... ela poderia ser construtiva, caso se encontrassem em fase, duas cristas ou dois vales, ou destrutivas*” (AA1). Dessa forma, podemos considerar que a licencianda interpretou o feixe de luz sob o ponto de vista ondulatório, previu a formação de interferência e o remeteu a uma identidade ondulatória.

Após as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*, a percepção para o comportamento do feixe de luz e compreensão da ocorrência da interferência permaneceram com caráter ondulatório. A Fig. 83 exhibe a representação da aluna AA1 no teste III para o feixe de luz ao longo *setup* experimental.

Figura 83 – Ilustração da aluna AA1 no teste III para representar o feixe de luz.



Fonte: A pesquisa.

A figura contempla duas representações ondulatórias para o feixe, a superposição das frentes de ondas sugere a causa do padrão previsto pela estudante. No excerto a seguir, extraído do segundo momento do *report aloud*, é possível observar a explicação destas representações.

AA1: Eu imaginei um feixe de luz atravessando pelas duas fendas. Ao passar pelas duas fendas, então, como é um feixe de luz, eu imaginei uma onda (Fig. 84 – I) e ele sofreria uma separação (Fig. 84 – II), e ao chegar no anteparo teria uma interferência entre ondas construtivas (Fig. 84 – III), pontos escuros, e ondas destrutivas, pontos onde não chega onda.

Figura 84 – (I) Movimento senoidal com uma das mãos aberta para representar uma onda. (II) Duas mãos lado a lado para simbolizar a onda após passar pelas fendas. (III) Dois dedos indicadores cruzados para descrever a superposição de duas frentes de onda.



Fonte: A pesquisa.

A linguagem gestual compatibilizou com o conteúdo verbal, e agregou elementos que propiciam a identificação efetiva das representações mentais e *drivers* empregados no momento da explicação do problema proposto. Sendo assim, há indícios factuais de que a aluna pensa de fato o feixe de luz durante o experimento, de acordo com a maneira descrita por palavras e gestos. Continuando com o diálogo, temos:

Pesquisador: E do que você lembrou para dar essa explicação?

AA1: A explicação em si, da fonte até chegar no anteparo, sem pensar na imagem do anteparo, eu imaginei das aulas, do desenho do próprio professor nas aulas de óptica e física moderna, onde ele desenhava as ondas (Fig. 85) sendo construtivas e destrutivas, quando tem, então, pico com vale. Mas a imagem em si [do anteparo], eu lembrava da simulação.

Figura 85 – Movimento oscilatório com o punho fechado para representar o desenho de uma onda, realizado pelo professor no quadro negro.



Fonte: A pesquisa.

A linguagem verbal e gestual presente no *report aloud* promoveu a identificação das representações mentais e *drivers* que remeteram ao comportamento ondulatório do feixe de luz no aparato experimental da dupla fenda. A aluna permaneceu com sua interpretação construída antes das atividades com as bancadas virtuais e *storyboards*. Portanto, as explicações das aulas da disciplina de óptica foram as principais responsáveis pela construção das representações mentais e *drivers* que projetaram a interpretação privada para este caso. Como os conhecimentos construídos *a priori* via mediação social e cultural foram suficientes, no entender da aluna, para explicar o fenômeno, não necessita da aquisição de novas representações abordadas nos *storyboards*, por exemplo.

Neste tocante, os licenciandos AA5 e AA6 seguiram uma linha de raciocínio ondulatória equivalente, ambos justificaram o padrão de interferência formado pelo anteparo a partir das interferências construtivas e destrutivas das componentes do feixe de luz que atravessam as duas fendas simultaneamente, explicação essa que pode ser exemplificada nos seguintes excertos, “o feixe vai passar pelas duas fendas e as ondas vão interagir uma com a outra (Fig. 86 – I)” (AA5), e “na medida que passa a luz, as duas ondas se encontram ali, cada uma passa por uma fenda, elas vão se encontrar (Fig. 86 – II) e vai causar a interferência” (AA6).

Figura 86 – (I) Aluno AA5 sinalizando a divisão dos feixes nas fendas e em seguida a sua interferência. (II) Aluno AA6 indicando a interferência dos feixes oriundos das duas fendas.



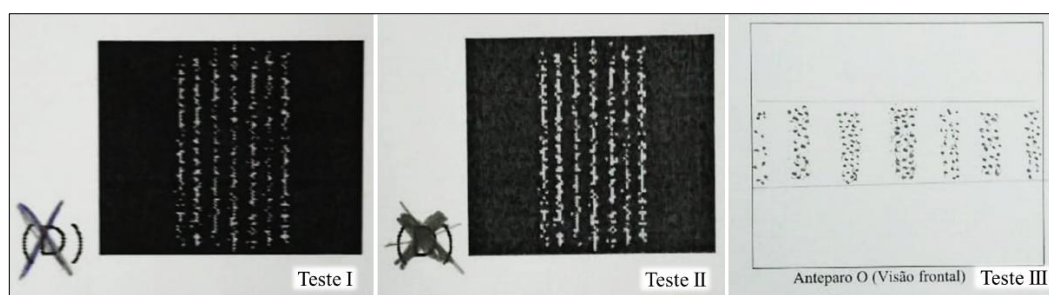
Fonte: A pesquisa.

Seguindo o movimento da análise, a próxima seção tratará dos resultados direcionados ao aparato experimental da dupla fenda com a fonte operando em regime quântico.

6.4.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais.

Para a configuração do experimento, a previsão do resultado de interferência ocorreu em todos os testes. Como a estudante AA1 é acadêmica da IES “A”, faz parte do primeiro grupo a participar do experimento. Para essa turma de licenciandos, os testes I e II aplicados abordaram de forma objetiva a previsibilidade do resultado no anteparo para a fenda dupla em regime quântico, isto é, os alunos tinham a opção de assinalar um padrão dentre os cinco dispostos nas alternativas. A Fig. 87 mostra o padrão desenhado no teste III e as alternativas escolhidas nos testes I e II.

Figura 87 - Respostas da aluna AA1 para a dupla fenda operando em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

O resultado escolhido para o teste I, de acordo com a estudante AA1, foi produto de um “chute”, uma escolha entre as alternativas “C” (apenas duas franjas claras no anteparo, posicionadas em frente as duas fendas) e “D” (padrão de interferência, Fig. 78 – I), “já que eu não tinha visto uma imagem, fiquei pensando qual seria” (AA1). E quanto à opção pela figura de interferência no teste II, a aluna afirmou “como eu tinha visto na simulação as franjas, então eu já marquei a letra D” (AA1). Na tentativa de explicar o motivo da ocorrência do padrão de interferência, já que essa foi a resposta assumida para o problema proposto, o seguinte recorte exemplifica o viés interpretativo adotado pela aluna,

AA1: Vai acontecer uma interferência, o fóton vai se comportar como uma onda, mas ele vai incidir como um corpúsculo

Pesquisador: Como funciona isso? Me explica, ele sai aqui da fonte e...?

AA1: Na verdade quando ele sai da fonte, eu imagino realmente uma setinha saindo da fonte (Fig. 88 – I)... eu imagino aquela mesma setinha do livro (Fig. 88 – II) (“Física Conceitual – Paul G. Hewitt”).

Figura 88 – (I) Dedo indicador em movimento oscilatório para representar o fóton. (II) Imagem mencionada pela aluna AA1, extraída de Hewitt, 2015, p.570.



Fonte: A pesquisa.

Nessa situação, o fóton foi imaginado como uma onda, delineada em formato de “setinha”. O gesto descritivo em conjunto com a descrição verbal revelou a representação mental e o *driver*. Tanto na fala quanto no gesto, a aluna remeteu à mediação cultural na forma de livro didático, sendo essa a inspiração para a descrição do objeto quântico no evento em questão. Na sequência do *report aloud*, temos:

Pesquisador: [...] agora me descreve o fóton saindo daqui [fonte] e chegando aqui [fendas].

AA1: Se eu conseguisse ver, eu veria um corpúsculo (Fig. 89 – I), passando por uma ou por outra fenda.

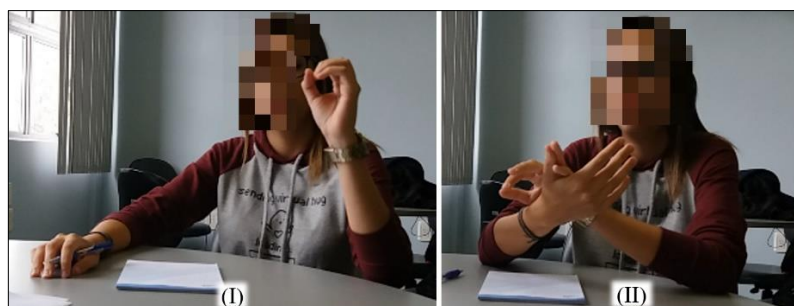
Pesquisador: E se ele passa por uma ou por outra fenda, um de cada vez, como acontece a interferência?

AA1: Ele se comportaria como uma onda até chegar no anteparo.

Pesquisador: [...] daí você mudaria para uma onda?

AA1: Aí, quando eu não estou observando a fenda eu imagino uma onda [...] na verdade eu sei que teria que acontecer [a interferência], se eu olhasse pra fenda eu veria corpúsculo, se eu sei o que vai acontecer eu já vejo ele passando como uma onda e chegando lá para acontecer o padrão de interferência (Fig. 89 – II).

Figura 89 – (I) Representação esférica para o fóton. (II) Uma mão sobre a outra para simbolizar uma superposição de ondas.



Fonte: A pesquisa.

O fóton foi indicado como uma onda quando o padrão de interferência era conhecido, ou seja, sem a presença de um detector, a aluna, a partir da interação com o *software*, teve o conhecimento do resultado no anteparo, “*eu sei o resultado porque lembro da simulação*” (AA1), logo, sua representação mental e *driver* para o fóton tendem ao comportamento

ondulatório. No entanto, a imagem corpuscular para o objeto quântico estava presente na sua estrutura cognitiva, mas condicionada à presença de um detector.

Pesquisador: Tu imaginas ondinhas, e por que é que aparecem pontinhos no anteparo?

AA1: Por que ele incide como corpúsculo, já que ele é uma partícula.

Pesquisador: Ele é uma partícula ou uma onda?

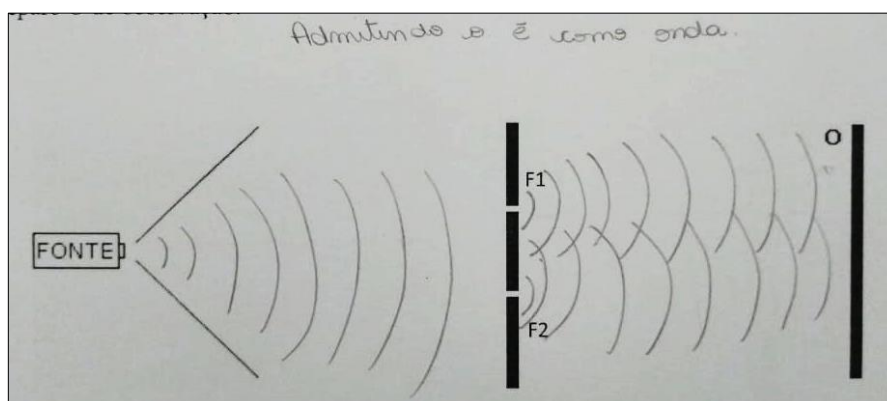
AA1: Eu imagino ele incidindo como corpúsculo, até porque na simulação você vê pontinhos, você vê umas bolinhas, se não me engano vermelhas, indo até o anteparo.

Novamente, a característica corpuscular do objeto quântico é levantada, induzida pela representação da simulação, a aluna reproduziu a visão de um corpúsculo colidindo com o anteparo. Dessa forma, foram assumidas duas ontologias para o objeto quântico, ambas condicionadas às situações em questão, a propagação ao longo do experimento e justificativa para a formação de interferência conduziram à inclinação ondulatória, já o caso da detecção nas fendas ou marcação no anteparo indicaram uma concepção corpuscular.

Até aqui, poderíamos considerar que a licencianda AA1 adotou uma interpretação próxima a dualista positivista, tendo em vista a conveniência em saber as situações experimentais juntamente com os seus resultados antes de imaginar e descrever o comportamento do objeto quântico. Essa inclinação ontológica e epistemológica será melhor analisada ao final da análise da aluna, quando os arranjos experimentais com a presença de um detector forem explorados.

Após as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*, a explicação de cunho ondulatório se manteve na resolução do teste III e no segundo momento do *report aloud*. A Fig. 90 apresenta a ilustração que retrata a evolução do elétron na dupla fenda.

Figura 90 - Ilustração da aluna AA1 no teste III para representar o elétron.



Fonte: A pesquisa.

Na ilustração do comportamento do elétron, a aluna deixou explícito assumir o elétron como uma onda para demonstrar o resultado de interferência formado no anteparo. A linguagem verbal e gestual presente nos excertos a seguir revelam a construção da explicação adotada

Pesquisador: Então me descreve, sai da fonte um elétron, como tu imaginas esse elétron saindo da fonte?

AA1: Bom, sem pensar então nas interpretações, porque quando na aula foi falado das interpretações, eu acabei... já pelas outras explicações que eu tinha dado, uma hora eu imagino um corpúsculo para algum determinado fenômeno e outra hora imagino uma onda para outro determinado fenômeno, eu acabei me identificando mais com o comportamento dualista positivista.

Pesquisador: Então você usou essa interpretação em toda resolução do teste?

AA1: Não. Não usei, porque eu sempre tinha essa concepção de que eu tinha que saber o que saía da fonte, e quando tu pedes para desenhar a trajetória, ok, aqui [após] as fendas eu sabia desenhar, só que antes de passar pelas fendas nesse caso, eu não sabia te dizer o que saía da fonte, eu acabei desenhando uma ondas, visto que parece que precisamos dar alguma figura pro elétron.

Esse segmento do diálogo projeta a autoavaliação da aluna AA1 quanto a sua interpretação privada para esta configuração do experimento. Ela descreveu sua identificação e preferência à postura dualista positivista. No entanto, afirmou não a ter utilizado no momento da resolução do teste III, pois expressou a necessidade de ter uma representação mental para o objeto quântico independentemente da situação experimental em que ele se encontra. A sequência dos excertos detalham as suas concepções

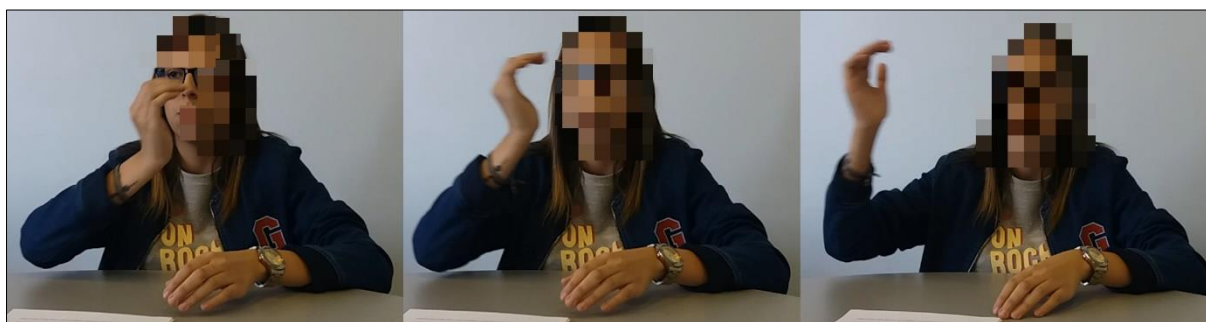
Pesquisador: [...] bom, e o que tu imaginas saindo da fonte?

AA1: Eu imagino uma onda saindo da fonte, uma onda pro elétron.

Pesquisador: Uma onda, como?

AA1: Uma onda como se fosse nos exemplos de difração (Fig. 91), é uma onda [circular]... que forma franjas.

Figura 91 - Sequência de movimentos semicirculares com a mão em forma de concha, representando uma onda.



Fonte: A pesquisa.

As ondas de difração mencionadas podem ser identificadas pelos gestos dinâmicos realizados, em que ondas semicirculares movimentam-se lateralmente, essa concordância entre

a linguagem verbal e gestual foi um consistente indicativo de representação mental para o elétron.

Pesquisador: E quando chega na frente das fendas, o que acontece?

AA1: Ao chegar na frente das duas fendas, essa onda vai passar pelas duas, acaba se dividindo (Fig. 92 – I), e ao se dividir ela vai se encontrando então com essas suas divisões (Fig. 92 – II) e vai formando os padrões de interferência, vai ter uma parte construtiva e destrutiva.

Figura 92 – (I) Duas mãos paralelas para representar a divisão da onda pelas fendas. (II) As duas mãos se encontram com movimentos semicirculares para ilustrar o encontro das frentes de ondas.

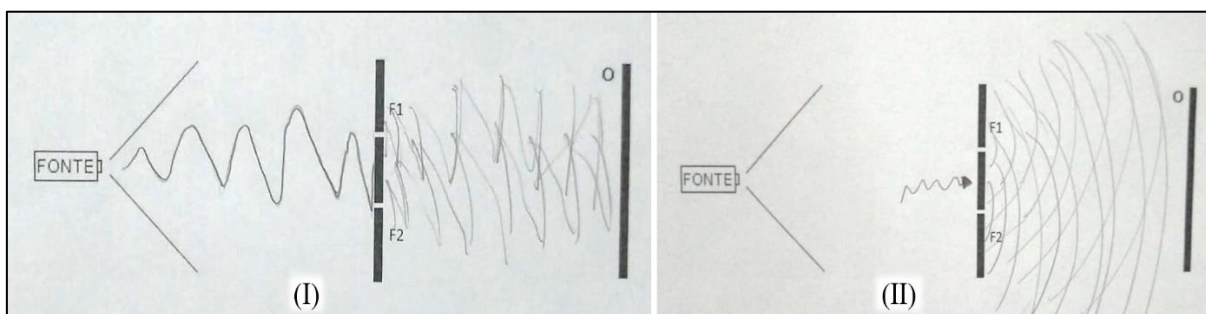


Fonte: A pesquisa.

Novamente, os gestos descritivos evidenciaram as representações mentais e *drivers* empregados na compreensão da dupla fenda em regime quântico. O elétron é, então, assumido com comportamento ondulatório e a ocorrência da interferência é resultado de uma superposição de frentes de ondas oriundas da passagem pelas fendas.

Essa percepção ondulatório para o comportamento do objeto quântico também foi expressa pelos licenciandos AA5 e AA6. O aluno AA5, por exemplo, mencionou “*nesse caso, pra mim, o elétron é uma onda* (Fig. 93 – I) ... *pra explicar é melhor como onda, faz muito mais sentido como onda*” (AA5), à vista disso, o licenciando AA6 comentou, “*nós vimos que vai ter interferência... se ele for em onda* (Fig. 93 – II), *passa pelas duas fendas e causam a interferência quando se encontram*” (AA6).

Figura 93 - (I) Ilustração do aluno AA5 e (II) Ilustração do aluno AA6 no teste III, para representar o elétron na dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

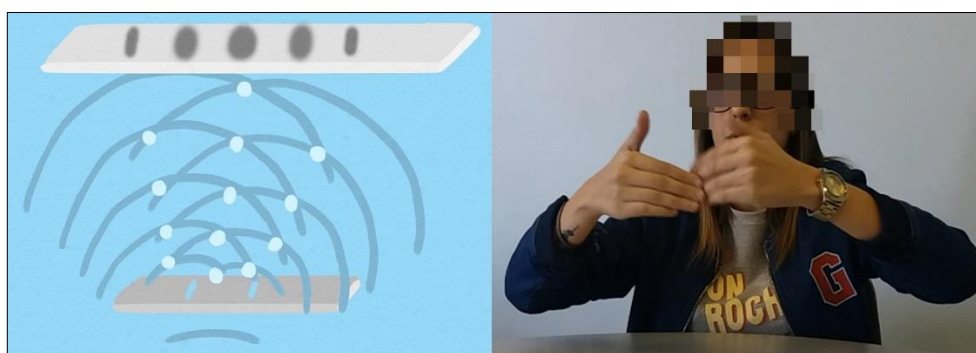
Em relação à mediação que contribuiu para a construção dos argumentos adotados pela aluna representativa AA1, destacamos o seguinte recorte de diálogo, assim como os gestos

Pesquisador: E essa explicação que você acabou de dar, você lembrou do que?

AA1: Eu lembrei das suas aulas [instruções com os *storyboards*], até tinha uma imagem azulzinha (Fig. 94), um gif, que mostrava esse tipo de trajetória.

AA1: Porque nas aulas, assim, se tu me perguntasses lá quando eu estava cursando óptica e física moderna eu diria que seria uma partícula saindo da fonte e passando pelas duas fendas e de certa forma não saberia te explicar como aconteceria a interferência.

Figura 94 - Comparação entre a imagem citada (utilizada no *storyboard*) e o gesto realizado pela aluna AA1.



Fonte: A pesquisa.

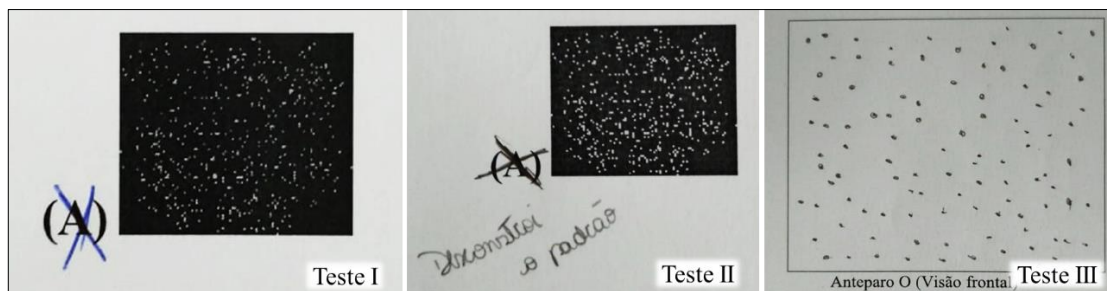
A comparação entre a imagem utilizada nos *storyboards* e o gesto realizado pela licencianda reforçaram a menção às instruções didáticas como sendo um dos mecanismos com destaque na contribuição para a modificação das representações mentais e *drivers*, e promoveram um estabelecimento interpretativo de caráter ondulatório para o comportamento do elétron na dupla fenda em regime quântico.

A próxima seção continuará tratando dos resultados direcionados ao aparato experimental da dupla fenda com a fonte operando em regime quântico, mas agora com o acréscimo de um detector.

6.4.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.

Com o acréscimo de um detector no arranjo experimental, o resultado no anteparo de visualização sofreu uma mudança sem a formação do padrão de interferência. Nos três testes, a previsão das respostas foi correta. Os resultados indicados pela aluna AA1 estão dispostos na Fig. 95, abaixo.

Figura 95 - Respostas da aluna AA1 para a dupla fenda operando em regime quântico com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

No primeiro momento do *report aloud*, a aluna justificou a sua opção pela resposta nos testes I e II como uma ação mecânica, condicionada à presença do detector. No teste I, a resposta surgiu pela leitura a respeito do tema em algum momento ao longo da sua vida acadêmica e, no teste II, a opção foi reforçada pela interação com a simulação computacional. O diálogo a seguir, sinaliza aspectos da argumentação empregada

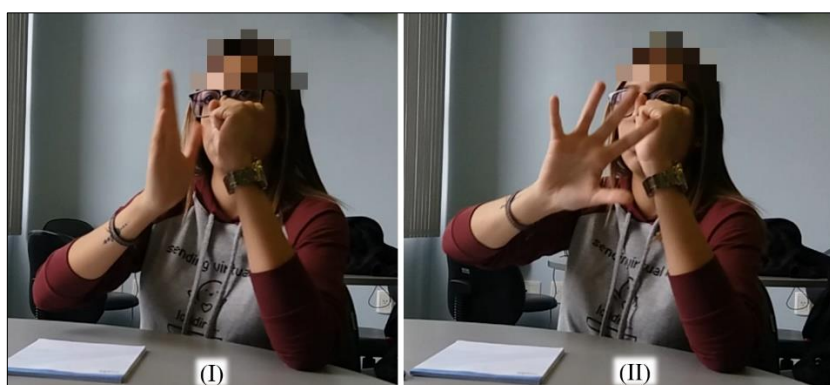
Pesquisador: Se eu colocar um detector, o que acontece?

AA1: Vai mudar, ou melhor, não vai ocorrer o padrão.

Pesquisador: Qual é o padrão de pensamento que surge, tu imaginas alguma coisa ou simplesmente me dá a resposta?

AA1: Na verdade eu estava simplesmente dando a resposta. Mas se eu parar pra pensar, talvez não teria como ocorrer a interferência, já que seria só [uma das fendas] ... eu não teria o outro lado, só teria um lado passando (Fig. 96-I), então acontece o espalhamento deles e não tem interferência (Fig. 96-II).

Figura 96 – (I) Representação da passagem de elétrons em apenas uma das fendas, devido a presença do detector. (II) Sinalização do espalhamento dos elétrons em toda área do anteparo.



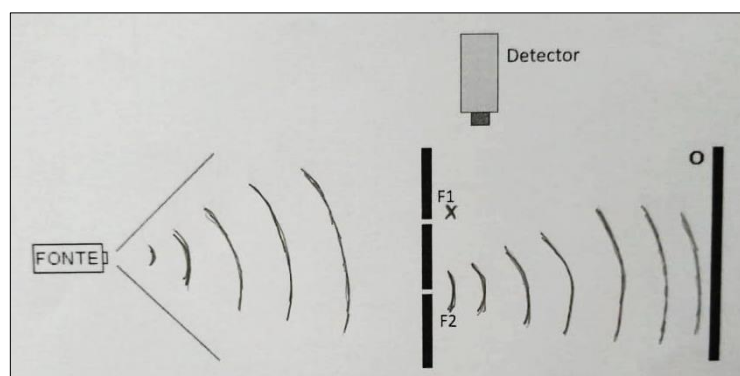
Fonte: A pesquisa.

Mesmo com o enunciado da questão mencionando a característica de “não-demolição” do detector, na explicação foi considerado como um mecanismo que, ao realizar a medida, obstrui a passagem do elétron por uma das fendas. Tanto a linguagem verbal quanto a gestual apontaram a representação mental e o *driver* condizentes com a passagem do elétron em apenas uma das fendas e com isso ocasiona a desconstrução do padrão de interferência. Contudo, no

primeiro momento do *report aloud*, não foi possível identificar se na fenda considerada “aberta” ocorreu a passagem de um corpúsculo ou de uma frente de onda.

Essa dúvida não ocorreu no segundo momento do *report aloud*, uma vez que a licencianda expressou sua interpretação ondulatória acerca do comportamento do elétron para essa configuração experimental. Vejamos na Fig. 97 a ilustração do elétron no *setup* experimental do teste III e logo após a sua justificativa.

Figura 97 - Ilustração da aluna AA1 no teste III, para representar o elétron na dupla fenda em regime quântico com a presença do detector.



Fonte: A pesquisa.

De acordo com a ilustração para o elétron, podemos identificar a interpretação ondulatória assumida, ainda que com a presença de um detector (não entendido pela aluna como de “não-demolição”), e, conseqüentemente, a não ocorrência do padrão de interferência. Isso significa que, mesmo tendo consciência do resultado de não interferência, “*eu sabia que não acontece a interferência por causa da simulação*” (AA1), as representações mentais e *drivers* da aluna AA1 inclinaram-se à interpretação ondulatória para explicar o comportamento do elétron nessa configuração experimental.

Pesquisador: Então me explica a trajetória de um elétron saindo da fonte.

AA1: Quando teria um detector né, eu imaginei a mesma representação daquele gif (Fig. 94).

Pesquisador: Tu imaginas ainda ele saindo como uma onda?

AA1: Sim. Ele saindo como uma onda (Fig. 98-I), igual ao anterior [sem detector]. Porém, quando ele vai passar pelas duas fendas como uma delas vai ter um detector ele vai ser “barrado” [aspas feitas pela própria aluna] (Fig. 98-II), eu imagino que não passe ali, no caso a onda, só teria onda na outra fenda e não causaria, não teria padrão de interferência, porque não causaria interferência entre as ondas, já que só teria uma onda se propagando (Fig. 98-III).

Figura 98 - (I) Mão em formato côncavo para representar uma frente de onda circular. (II) Duas mãos em contato para indicar a interação entre a onda e o detector. (III) Sinalização de duas frentes de ondas, uma que continua seu deslocamento (mão direita da aluna) e a outra frente de onda que permanece parada (mão esquerda da aluna).



Fonte: A pesquisa.

A sequência de gestos ilustra o comportamento do elétron mencionado pela aluna durante o segundo momento do *report aloud*. Na Fig. 98-I é indicada a propagação de uma onda circular que, ao passar pelas fendas, encontra o detector, que, na concepção da aluna, acaba barrando uma porção da onda (Fig. 98-II). Em seguida, a linguagem gestual retrata com o movimento de uma das mãos a evolução da trajetória de apenas uma frente de onda, enquanto a outra fração da onda, representada pela segunda mão, permanece estática. Neste quadro, as imagens destacadas nos auxiliam na compreensão da interpretação adotada para argumentar conceitualmente o resultado do experimento.

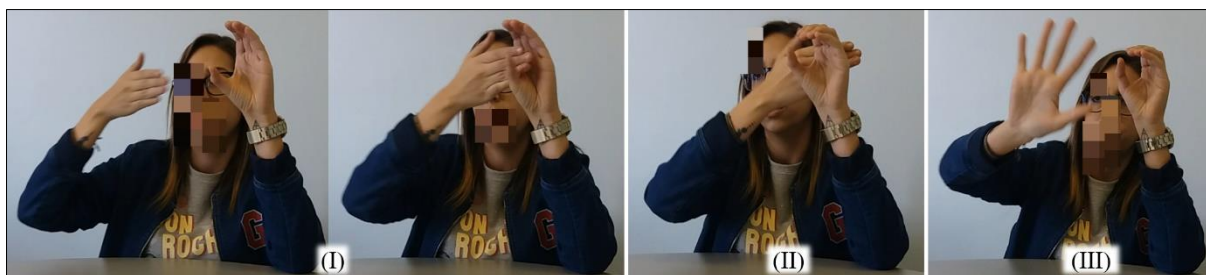
Na explicação, a aluna atribuiu ao detector a capacidade de bloquear a passagem de uma frente de onda, mesmo tendo o conhecimento de que o detector não barra o percurso do objeto quântico, “*na verdade, essa explicação eu construí, porque eu não vi em nenhum lugar, realmente, a onda não passando por um detector*” (AA1). No entanto, para justificar a não formação do padrão de interferência, a licencianda sentiu a necessidade de acrescentar hipoteticamente uma característica ao detector, e, desta maneira, dar sentido a sua explicação.

Ainda sobre a ação do detector, o trecho seguinte detalha a concepção da aluna para a detecção

Pesquisador: E tu imagina uma situação de como o detector influencia nesse resultado?

AA1: Como o detector, ele é também, por exemplo uma lâmpada né, emite uma radiação ela acaba atrapalhando essa onda, já que ela também, por exemplo uma lâmpada também seria uma outra onda e esse elétron ou fóton iria passar por esse detector (Fig. 99 – I) e ao passar por esse detector sua trajetória é mudada (Fig. 99 – II) então ele não bateria no anteparo, iria para algum outro lugar (Fig. 99 – III).

Figura 99 – (I) Representação do movimento do elétron chegando no detector (II) Indicação da mudança da trajetória do elétron. (III) Sinalização da dispersão do elétron ao não chegar no anteparo.



Fonte: A pesquisa.

A ação do detector foi explicada em termos de perturbação da onda que configura o elétron. Neste ponto, a aluna AA1 não seguiu as conjecturas da interpretação ondulatória ao não mencionar, por exemplo, possíveis colapsos da função de onda. Ainda assim, as evidências levantadas através da linguagem verbal e gestual nos três segmentos do experimento da dupla fenda nos possibilita sustentar a asserção de que a interpretação privada da estudante AA1 se estabeleceu, até o momento, na orientação ondulatória realista.

A previsibilidade da não formação do padrão de interferência no anteparo de visualização também foi acertada no teste III pelos alunos AA5 e AA6. No entanto, ambos os licenciandos apresentaram conflitos em seus *drivers* e representações mentais no momento de descrever o comportamento dos objetos quânticos e a desconstrução do padrão de interferência. Por exemplo, o aluno AA6 inicialmente imaginou o elétron como uma onda saindo da fonte e, devido o ato de detecção, alterou por motivos desconhecidos a sua ontologia para um corpúsculo, “*poderia sair como uma onda e quando ele é detectado vira um corpúsculo*” (AA6), ocasionando assim a desconstrução da interferência. No entanto, a influência do detector no experimento e sua possível interação com o objeto quântico não eram compreendidos e nenhuma proposição foi construída. O aluno, ao ser questionado a esse respeito, respondeu “*eu não sei, não saberia te explicar [a ação do detector]*” (AA6).

O licenciando AA5 expressou um comportamento semelhante ao descrever o elétron com características ondulatórias até se deparar com o detector no seguimento do arranjo experimental, quando subitamente comporta-se como um corpúsculo, “*ele saiu da fonte, no caso, até aqui [região que antecede as fendas] eu não tenho um detector, como uma onda, e quando chega no detector se comporta como um corpúsculo*” (AA5). Neste caso, a ação do detector também não foi totalmente esclarecida, o aluno mencionou a sensibilidade do objeto quântico a uma energia emitida pelo detector “*ele [elétron] é sensível, e tu precisa aplicar uma energia e vai interferir*” (AA5), mas não justificou a abrupta mudança de comportamento do objeto quântico.

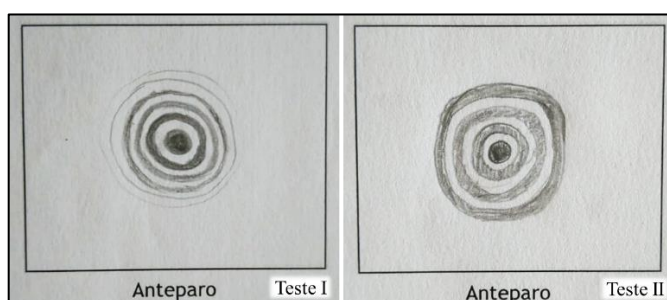
Ainda que alterem suas representações mentais e *drivers* na tentativa de justificar um resultado característico de não interferência, o comportamento ondulatório foi tomado como fundamental no momento da emissão realizada pela fonte. As alterações provocadas pelo detector, mencionadas pelos licenciandos, podem se aproximar do colapso a um ponto da onda previamente espalhada, abordada pela interpretação ondulatória (realista).

Dando seguimento à análise, o próximo passo será a apresentação dos resultados expressos pela aluna AA1 para as configurações experimentais do IMZ.

6.4.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.

Essa configuração experimental não estava presente no teste I aplicado ao grupo de licenciandos da IES “A”. Mas a situação em que a fonte é regulada para emitir um feixe de luz foi abordada nos testes II e III. Como esperado, pelo fato da interação com a bancada virtual em momento anterior à resolução desses testes, a previsão do resultado nos anteparos foi correta. A Fig. 100 exibe os dois padrões de interferência desenhados pela aluna AA1.

Figura 100 - Respostas da aluna AA1 nos testes I e II, para o IMZ em regime clássico.



Fonte: A pesquisa.

No primeiro momento do *report aloud*, a estudante justificou sua resposta alegando uma memorização do resultado surgido no anteparo “*eu vi na simulação*” (AA1). A explicação para a formação da interferência fundamentou-se nos princípios ondulatórios clássicos, isto é, ocorre a divisão do feixe de luz no primeiro semirrefletor e, após a passagem pelo segundo, as porções do feixe inicial se superpõem ocasionando interferências construtivas e destrutivas no anteparo. O recorte do teste II (Fig. 101), revela a explicação adotada

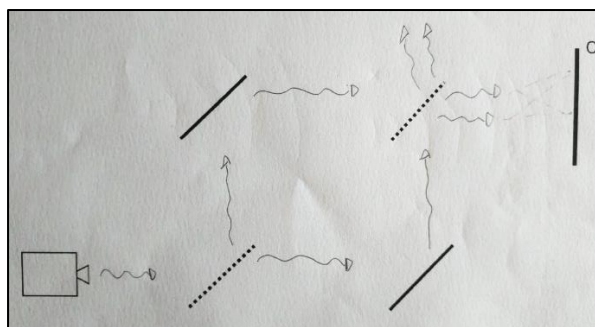
Figura 101 – Recorte da explicação dissertada pela aluna AA1.

Como chegam 2 feixes de luz, os mesmos sofrem interferências
constitutivas (franjas claras - pretas neste caso) e destrutivas (franjas escuras -
brancas).

Fonte: A pesquisa.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, o padrão de interferência novamente foi fundamentado em termos ondulatórios a partir da divisão inicial e posterior superposição dos feixes secundários. O esquema a seguir (Fig. 102), presente no teste III (não solicitado no teste II da IES “A”), sinaliza a ilustração da licencianda para a trajetória do laser no arranjo experimental do IMZ.

Figura 102 - Ilustração da aluna AA1 no teste III, para representar o feixe de luz no IMZ.



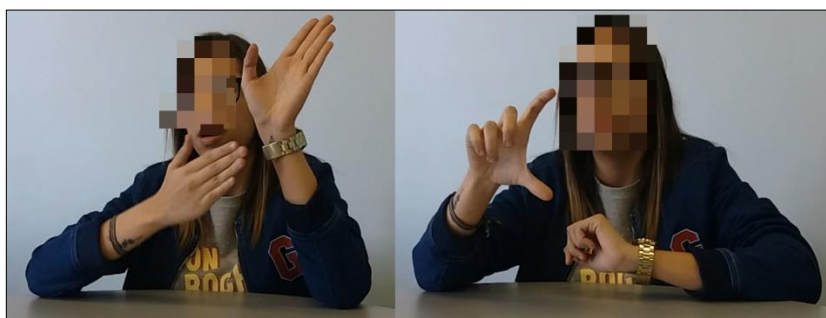
Fonte: A pesquisa.

A representação para o comportamento do laser no IMZ reforçou as representações mentais e *drivers* de cunho ondulatório empregados na resolução do problema proposto. Do segundo momento do *report aloud*, por meio da linguagem verbal, levantamos mais um indicativo que sinaliza a interpretação ondulatória assumida para o comportamento do feixe de luz no IMZ:

AA1: [...] Quando tem, então, um feixe de luz, eu imagino a mesma representação para os fótons, o feixe como uma onda senoidal. Ele chegaria no primeiro espelho, que é o semi refletor, ele se dividiria, parte seguiria por um caminho, parte por outro. Ao chegarem nos espelhos das extremidades, que são refletores, eles seriam refletidos nas direções que as setinhas apontam, e ao chegarem no último, que também é semi refletor, parte nesse caso iria pra cá [apontando no esquema do IMZ no teste III] e pra cá, nesse caso eles iriam bater no anteparo juntos e então iam causar uma interferência, e os outros iriam para outro lado. E ao chegarem no anteparo, esses dois feixes que saíram, que formam a interferência, se encostam, chegando no anteparo e formando o padrão.

Além do mais, podemos identificar as mediações que contribuíram tanto para a escolha pelo padrão de interferência quanto para a explicação conceitual do surgimento dessas franjas claras e escuras no anteparo. Deste modo, a bancada virtual foi responsável pela lembrança da imagem como resposta no anteparo “o resultado eu tirei da simulação” (AA1). Já os desdobramentos conceituais do experimento da dupla fenda, abordados nos *storyboards*, auxiliaram na idealização da ocorrência da interferência, como pode ser testemunhado com a seguinte passagem: “[...] *na última parte, quando chega no segundo espelho semirrefletor, pra causar essa interferência, eu imaginei praticamente como se fosse a fenda dupla (Fig. 103), ah, tem a fenda dupla, então eu vou dividir esse feixe e então vai ter interferência construtiva ou destrutiva*” (AA1).

Figura 103 – Sequência de gestos representando o experimento da dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

Os gestos descritivos realizados evidenciam o acesso às representações mentais e *drivers* que se relacionam com o experimento da dupla fenda. A interpretação ondulatória para o feixe de luz já tinha sido adotada na explicação do experimento da dupla fenda nessas condições. No entanto, a sua menção no momento da análise do resultado observado no IMZ indica que os *storyboards* reforçaram a ideia da divisão do feixe e a posterior interferência construtiva por meio da superposição das ondas. Assim, a aluna utilizou os conhecimentos construídos com as instruções didáticas para modelizar o comportamento do laser ao longo de todo *setup* experimental do IMZ.

A divisão dos feixes no primeiro espelho semirrefletor também foi o atributo principal das justificativas dos alunos AA5 e AA6 para explicar os resultados previstos. De acordo com o estudante AA5, houve formação do padrão de interferência, pois o feixe de luz “*são fótons, diversas ondas (Fig. 104 – I) ... divide [no primeiro espelho semirrefletor], reflete (Fig. 104 – II) e depois algumas vão se perder, e as que sobram formam o padrão de interferência*” (AA5). Uma descrição ondulatória semelhante foi apresentada pelo licenciando AA6 “*o feixe é uma onda... senoidal (Fig. 104 – III) ... uma parte é refletida e a outra atravessa (Fig. 104 – IV) o espelho [semirrefletor]*” (AA6), ainda que em seu teste III, tenha indicado incorretamente a não

formação de interferência. Não acontece a interferência “*por causa da diferença do caminho óptico*” (AA6), esta foi a explicação adotada pelo aluno AA6 no segundo momento do *report aloud*.

Figura 104 – (I) AA5 com a mão esquerda em movimento de “zigue-zague” para representar uma onda se propagando. (II) AA5 sinalizando a divisão do feixe de luz no primeiro espelho semirrefletor. (III) AA6 movimentando verticalmente o dedo indicador da mão esquerda para sinalizar um movimento senoidal. (IV) AA6 indicando a refração de uma porção do feixe de luz incidente no espelho semirrefletor.



Fonte: A pesquisa.

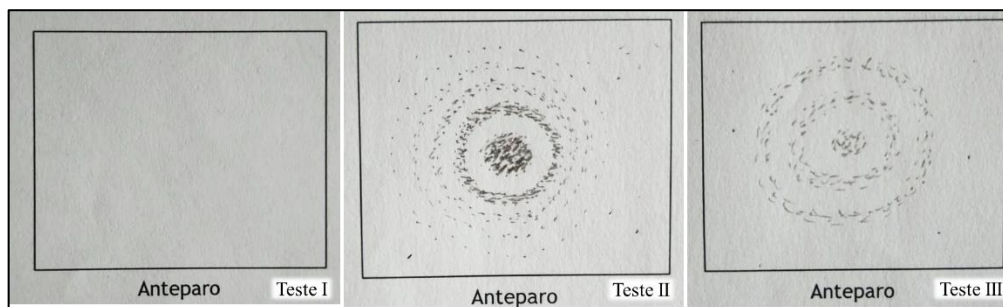
Desta forma, mesmo que com previsões distintas para a imagem a ser formada no anteparo, ambos mantiveram suas inclinações interpretativas essencialmente de cunho ondulatório.

Na sequência, apresentaremos a análise sobre os resultados direcionados ao IMZ em regime quântico.

6.4.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais

A operação em regime quântico do IMZ é caracterizada pela emissão individual de fótons realizada pela fonte. Para essa configuração experimental, o resultado observado no anteparo também é o de um padrão de interferência. Quanto à previsão dos resultados, no teste I, a aluna AA1 optou por não desenhar uma imagem no anteparo e nem justificar o motivo para tal, deixou a questão totalmente em branco. Porém, nos testes II e III, a previsão dos resultados foi correta, em ambos houve a sinalização de uma figura de interferência no anteparo, a Fig. 105 mostra as três respostas.

Figura 105 - Respostas da aluna AA1 para o IMZ operando em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

No teste II, para explicar a formação do padrão de interferência escolhido como resposta, a licencianda utilizou propriedades da interpretação ondulatória para o comportamento do fóton no IMZ. O resultado em si se originou da lembrança da bancada virtual e, de acordo com a aluna, no primeiro momento do *report aloud*, a interferência aconteceu da seguinte forma:

AA1: Eu continuo com aquela ideia de que ele se propaga aqui [apontando para o IMZ], como uma onda que se divide em duas e sofre interferência, e por isso ocorre o padrão aí.

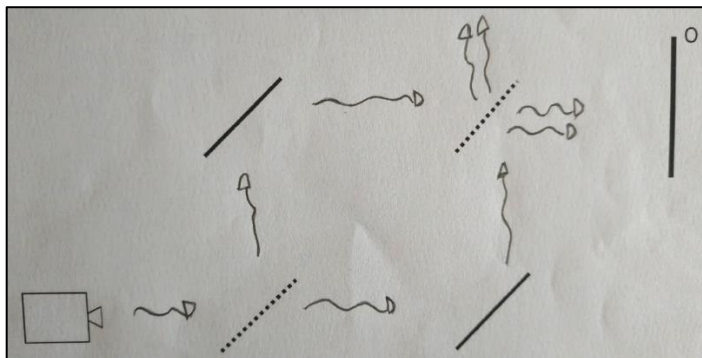
Pesquisador: E essa onda se divide?

AA1: Sim, assim como a luz.

Esse excerto reflete a interpretação privada da aluna AA1, na qual o fóton assume um comportamento ondulatório. Essencialmente, as interferências causadas pelo fóton e pelo feixe de luz (situação anterior) foram explicadas de forma semelhante. Essa construção das representações mentais e *drivers* para solucionar o IMZ em regime quântico surgiu a partir da interação com as bancadas virtuais e também da compreensão do mesmo experimento, mas em regime clássico, haja visto a mesma questão não respondida no teste I.

Após as instruções didáticas, a estudante manteve o seu entendimento acerca do caráter ondulatório assumido pelo fóton no arranjo experimental. A ilustração da trajetória do fóton no esquema do IMZ na Fig. 106 expõe as características ondulatórias atribuídas.

Figura 106 - Ilustração da aluna AA1 no teste III, para representar o fóton no IMZ em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

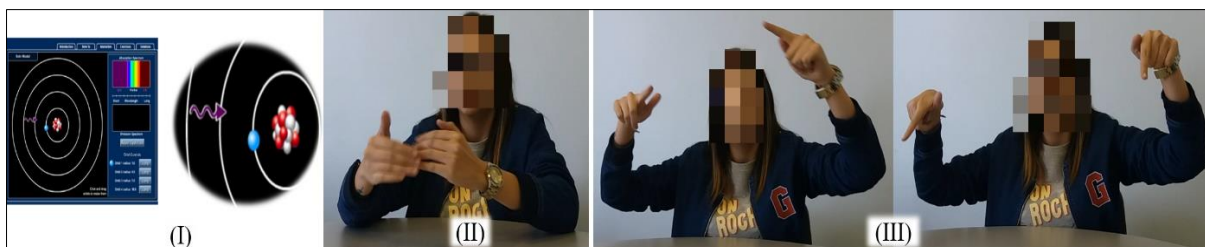
Além da representação gráfica do objeto quântico com tendências ondulatórias, a linguagem verbal e gestual do segundo momento do *report aloud* substanciam as representações mentais e os *drivers* articulados na compreensão do resultado. Vejamos o seguinte excerto:

AA1: Para os fótons eu também imagino uma setinha, visto lá no átomo de Bohr [simulação computacional] (Fig. 107 – I), então novamente ele vai sair uma setinha, uma onda que seria um fóton né, menor quantidade, sai essa onda, passa pelo espelho semi refletor, então ela divide, vai para os extremos onde estariam os espelhos totalmente refletoras, reflete, volta para o espelho semi refletor e novamente acontece o mesmo tipo de interferência.

Pesquisador: [...] E se fosse um elétron, se a fonte estivesse emitindo elétrons individuais?

AA1: Pro elétron a onda que eu imagino é aquela circular, mas eu faria uma analogia dessa mesma forma, ele também chegaria no espelho semi refletor e parte iria para um lado, parte para outro (Fig. 107 – II), só que agora eu imaginaria aquela outra onda [circular] (Fig. 107 – III), e chegaria no anteparo da mesma forma, ao chegar no último também sofreria um padrão de interferência análogo a dupla fenda.

Figura 107 – (I) Representação do átomo de Bohr citada pela aluna. (II) Mãos em formato côncavo para representar as duas frentes de ondas ao passarem pelo espelho semi refletor. (III) Sequência de movimentos circulares com os dois dedos indicadores para sinalizar as ondas circulares imaginadas.



Fonte: A pesquisa.

Tanto as representações mentais e *drivers* a respeito do fóton, quanto as relacionadas ao elétron seguem o comportamento ondulatório. A forma imaginada para o fóton continuou sendo o de uma “setinha” (AA1), inspirada na simulação referente ao átomo de Bohr citada pela aluna

(representação semelhante à Fig. 88 – III). Já o elétron, foi novamente caracterizado como uma onda de caráter circular, análoga, de acordo com a aluna, ao seu comportamento no experimento da dupla fenda.

Desse modo, podemos confirmar a modelização científica realizada no alcance da compreensão e explicação do experimento. Os mecanismos externos de mediação compostos pelas bancadas virtuais e pelos *storyboards* forneceram elementos conceituais que foram assimilados e empregados pela aluna AA1 na descrição do comportamento do objeto quântico sob o ponto de vista da sua interpretação privada, que se aproximou de uma tendência ondulatória realista.

O licenciando AA5, por exemplo, manteve sua postura interpretativa justificando o padrão de interferência corretamente previsto no anteparo e com a adoção do comportamento ondulatório para o objeto quântico de maneira bem próxima à manifestada pela aluna AA1. Isto é, o fóton foi descrito como uma onda que se divide no primeiro espelho semirrefletor seguindo pelos dois caminhos possíveis do IMZ, a superposição das porções das ondas acontecem após o segundo espelho, formando as interferências construtivas e destrutivas vistas no anteparo. O seguinte excerto revela o raciocínio apresentado,

Pesquisador: O que tu imaginas saindo da fonte?

AA5: Uma onda...e ela vai se dividir em duas aqui [aponta para o primeiro] espelho semirrefletor].

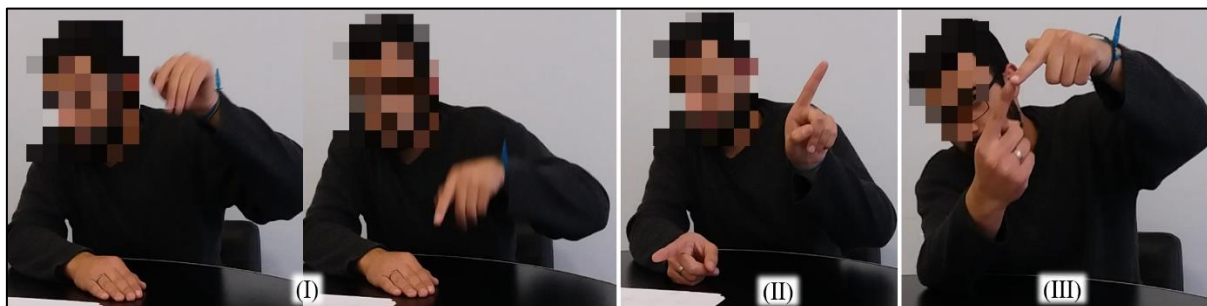
Pesquisador: E como é essa onda?

AA5: Senoidal (Fig. 108 – I).

Pesquisador: Chega no espelho semirrefletor...

AA5: Ela vai dividir (Fig. 108 – II), de repente em duas de menor intensidade, enfim, refletir e aqui, no encontro delas (Fig. 108 – III), vai gerar o padrão de interferência... mesmo sendo um fóton por vez.

Figura 108 – (I) AA5 movimentando verticalmente a mão esquerda para representar uma onda senoidal. (II) Os dois indicadores em sentidos opostos para sinalizar a divisão ondulatória objeto quântico. (III) Os dois indicadores em encontro para representar a superposição das frentes de onda.



Fonte: A pesquisa.

Para essa configuração experimental, o aluno AA6 previu a ocorrência do padrão de interferência (memorização da interação com o *software*), e a sua justificativa construída para

tal, também se fundamentou com a perspectiva ondulatória para o objeto quântico. Portanto, a exemplo dos licenciandos AA1 e AA5, a interferência ocorreu “*sai uma onda [da fonte] ... ele é refletido para cima e atravessa o espelho [semirrefletor]... e depois vai ter interferência entre as ondas, causando esse padrão*” (AA6).

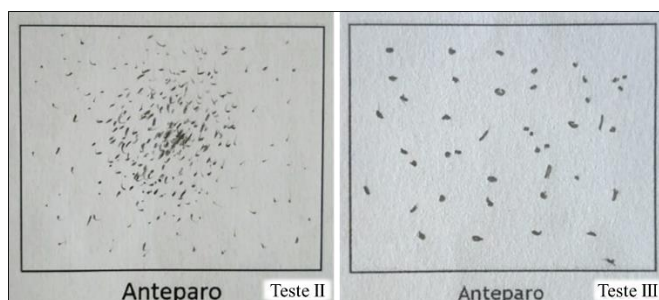
Na seção seguinte, apresentaremos a análise sobre os resultados direcionados ao IMZ em regime quântico com a presença de um detector.

6.4.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.

Conforme explicado anteriormente, a acadêmica AA1 pertence ao primeiro grupo a participar do experimento, o grupo da IES “A”. O teste I, aplicado a esta turma, não abordou de forma direta a previsibilidade do resultado do padrão a ser formado no anteparo quando o IMZ opera em regime quântico com a presença de um detector. Portanto, analisaremos as representações mentais e *drivers* utilizadas para identificar a interpretação privada e a modelização científica nos testes II (aplicado após as bancadas virtuais) e III (aplicado após os *storyboards*).

Em ambos os testes, o resultado de não formação do padrão de interferência foi previsto. A Fig. 109 apresenta as ilustrações realizadas, observa-se que os pontos traçados estão dispersos pela região delimitada pelo anteparo, o que caracteriza a não ocorrência do padrão de franjas circulares claras e escuras.

Figura 109 - Respostas da aluna AA2 nos testes II e III, para o IMZ em regime quântico



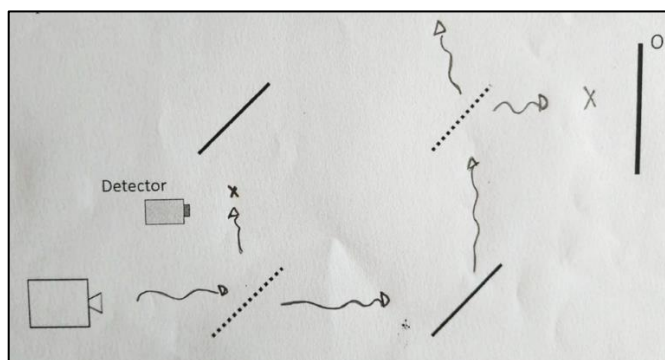
Fonte: A pesquisa.

Para justificar a escolha do resultado no teste II, a aluna AA1 dissertou a seguinte explicação: “*O detector, ao detectar um fóton, barra a sua passagem, impedindo que, por aquele lado, chegue ao anteparo (interage com o experimento)*” (AA1). Essa explicação reflete a mesma utilizada para a dupla fenda (no momento do teste II), em que a concepção apresentada sugeriu a bloqueio por parte do detector da passagem do fóton por um dos caminhos possíveis,

e, com isso, impossibilitou a formação da interferência. Tendo em vista as concepções apresentadas pela aluna nos momentos que antecederam as instruções didáticas, podemos considerar que o detector foi identificado como um mecanismo que barra a passagem de uma porção do fóton, que é dividido no primeiro espelho semirrefletor, com isso não ocorre posteriormente a superposição das ondas e a interferência.

Na resolução do teste III, a justificativa para o padrão de interferência é representada graficamente no esquema abaixo (Fig. 110).

Figura 110 - Ilustração da aluna AA1 no teste III, para representar o fóton no IMZ em regime quântico com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

Podemos observar que a representação ondulatória para o fóton se mantém presente mesmo sem a formação do padrão de interferência, isso indica o estabelecimento de uma interpretação privada de cunho ondulatória realista. A linguagem verbal e gestual destacadas nos seguintes trechos do *report aloud* reforçam este reconhecimento

AA1: Nessa parte eu desenhei o resultado pensando na dupla fenda, quando eu coloquei o detector, eu já sabia o resultado que iria dar, também devido a simulação do próprio experimento.

AA1: Não causaria esse padrão [interferência], visto que a onda logo no primeiro espelho semi refletor não iria para esse lado [apontando para um dos caminhos do IMZ], ela seria barrada pelo detector.

Pesquisador: Tu achas que o detector barra o feixe que passa por ele?

AA1: Barrar é meio forte, mas ele acaba interferindo com esse feixe não deixando ele seguir a trajetória que o aparato experimental dá para ele, não que ele barra, ele apenas modifica.

Evidencia-se, portanto, que o resultado foi oriundo da lembrança da dupla fenda e que as articulações das representações mentais e *drivers* também foram importados para essa configuração do IMZ. A explicação da interação do detector com um dos feixes de onda que compõe o fóton fazem com que sua trajetória se modifique e não chegue ao anteparo para causar a superposição com a outra porção de onda, é praticamente a mesma utilizada na situação envolvendo a dupla fenda.

A sequência do relato destaca a concepção assumida pela aluna AA1 para o comportamento do fóton

Pesquisador: Como tu imaginas o fóton saindo da fonte?

AA1: O fóton eu imagino uma ondinha (Fig. 111 – I), chega no primeiro espelho, como ele vai se dividir (Fig. 111 – II), porém como em um lado tem esse detector ele acaba modificando a trajetória (Fig. 111 – III), enfim, interferindo, e não chega até o segundo espelho, deixando apenas um feixe passar.

Figura 111 – (I) Sequência de gestos oscilatórios sobre a mesa para representar uma onda. (II) Representação da divisão do fóton. (III) Sinalização do detector modificando a trajetória de um dos feixes do fóton.



Fonte: A pesquisa.

A linguagem gestual externalizada que se assemelha aos gestos descritivos utilizados no segmento da dupla fenda corroborou com o seu discurso verbal e consolidou a sua postura ondulatória realista para interpretar o comportamento do objeto quântico. Com base neste contexto sistematizado, podemos assinalar a contribuição dos mecanismos externos de mediação utilizados no estudo para o estabelecimento interpretativo e para a modelização espontânea realizada em virtude da transferência de fundamentos conceituais direcionados de uma situação problema para outra.

Novamente, o arranjo experimental com a presença de um detector também proporcionou dificuldades interpretativas aos alunos AA5 e AA6. Em termos ontológicos atribuídos ao objeto quântico, o caráter ondulatório se manteve na concepção de ambos os estudantes. O aluno AA6, por exemplo, reportou, “*saindo da fonte eu imagino [o objeto quântico como] uma onda senoidal*” (AA6), e seu comportamento ao longo do *setup* experimental foi apontado como o de quando o detector não estava presente. A desconstrução do padrão de interferência foi escolhida como resposta no teste III devido à memorização do resultado fornecido pela bancada virtual. O resultado não foi explicado pelo aluno AA6, visto que ele alegou não entender suficientemente a influência/interação do detector, “*eu não saberia dizer como é a interação do detector*” (AA6).

Para o aluno AA5, o objeto quântico comporta-se como onda ao sair da fonte emissora, e, ao chegar no primeiro espelho semirrefletor, acaba se dividindo, em seguida à porção ondulatória que ruma pelo caminho com a presença do detector sofre uma determinada

interação que o licenciando não sabia ao certo como decorre, “*essa onda aqui [a metade que seguiu pelo caminho do detector] foi influenciada, não vai poder formar o padrão com essa [outra metade da onda], perde o padrão*” (AA5). Deste modo, foi justificada a desconstrução do padrão de interferência nesta configuração experimental do IMZ.

Sendo assim, podemos constatar que a principal dificuldade e não coerência mantida com os fundamentos da interpretação ondulatória é a questão relacionada à presença do detector e a sua influência no experimento, a ponto de alterar o resultado no anteparo de visualização. A mesma interrogação acerca da realização da medida/observação esteve presente no arranjo experimental da dupla fenda.

Concluída a análise dos resultados levantados acerca deste grupo interpretativo, desenvolveremos, em seguida, a apreciação dos dados relacionados à aluna representativa chamada de “AA2”, escolhida para corresponder ao grupo de estudantes inclinados à Interpretação Corpuscular (Realista) durante o entendimento e a justificativa dos resultados observados nas diferentes configurações dos experimentos virtuais.

6.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO CORPUSCULAR (REALISTA) - A LICENCIANDA AA2 COMO ALUNA REPRESENTATIVA.

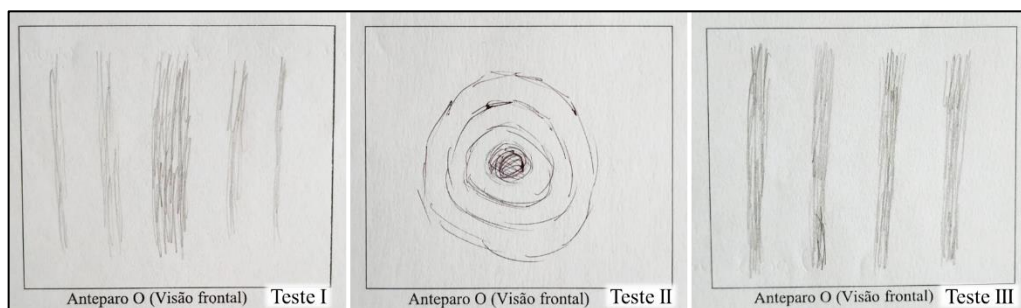
A aluna AA2 é integrante da turma pertencente a IES “A”. Portanto, compõe o primeiro grupo que realizou todas as etapas do experimento deste estudo. Ressaltamos que a escolha pela licencianda AA2 como indivíduo representante da Interpretação Corpuscular (Realista) ocorreu justamente pelo fato de suas representações mentais e *drivers*, quando comparado aos demais sujeitos enquadrados neste grupo interpretativo, inclinarem-se com mais ênfase a um caráter corpuscular no momento de compreender e explicar o comportamento dos objetos quânticos nas diferentes configurações dos experimentos da dupla fenda e do IMZ. Ademais, reconhecemos outros dois licenciandos com posicionamento correspondente, incluídos neste grupo interpretativo, são eles: AA7 e AA8.

Seguindo o movimento da análise, as primeiras questões a serem exploradas estão direcionadas ao experimento da dupla fenda, com seu início com a operação em regime clássico, na qual a fonte emite um feixe de luz.

6.5.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.

Para esta configuração experimental, houve, nos três testes, a correta previsibilidade do padrão de interferência como resultado. A Fig. 112 compara as imagens desenhadas no anteparo de visualização.

Figura 112 - Respostas da aluna AA2 para a dupla fenda operando com feixe de luz.



Fonte: A pesquisa.

Como justificativa para a opção pelo desenho de interferência, no próprio teste I, a aluna AA2 dissertou a seguinte frase: *“Tentei representar uma possível interferência, pois já estudei alguma coisa do gênero em Óptica e Física Moderna [disciplina que antecede a disciplina de MQ]”* (AA2). Desse modo, o resultado do experimento foi proveniente de uma mediação social e cultural prévia a partir de momentos em sala de aula anteriores ao início do estudo. Para o resultado do teste II, no primeiro momento do *report aloud*, a licencianda citou novamente a influência das aulas anteriores e a sua mudança na representação do anteparo devido à lembrança de um laser no momento da resolução *“[...] depois de usar a simulação, de fato eu voltei com a ideia, me vem um laser na cabeça, e aí se tu observares bem o laser, ele tem sempre um ponto de maior intensidade no meio e as extremidades são mais fracas”* (AA2).

Na explicação de como acontece a formação da interferência no anteparo, para ambos os testes, a licencianda mencionou a questão da probabilidade para o comportamento do laser imaginado, o excerto a seguir revela essa concepção

Pesquisador: Como tu imaginas esse laser saindo da fonte?

AA2: Eu imagino um risco (Fig. 113)

Pesquisador: E quando chega nas fendas?

AA2: Ah, hoje eu vou por F1 [fenda 1], ah, amanhã eu vou por F2 [fenda 2]

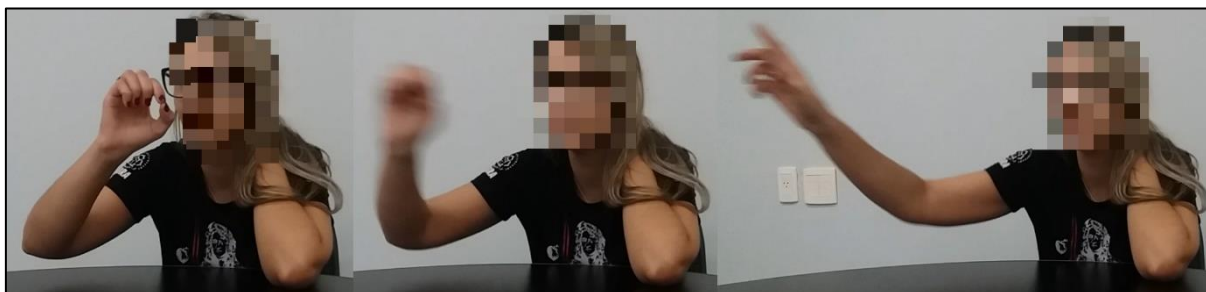
Pesquisador: E por que ocorreria o padrão de interferência?

AA2: Eu acho que probabilidade, chances de ele de fato, se for pela esquerda ou pela direita, se encontrar lá no meio com maior chance. [...] eu acredito que seja a probabilidade de cair mais num lugar do que em outro.

Pesquisador: E essa tua imagem de um risco e ele passando por uma fenda ou por outra, lembra de ter visto em algum lugar, ou você a construiu pra explicar o resultado?

AA2: Eu tenho a imaginação fértil, eu acho que fui eu, não lembro de ter visto em algum lugar [...] quando eu vi o negócio real, concreto ali na simulação eu comecei a dar luz a minha criatividade.

Figura 113 – Sequência de gestos para representar um feixe de luz se propagando como um “risco” (AA2).



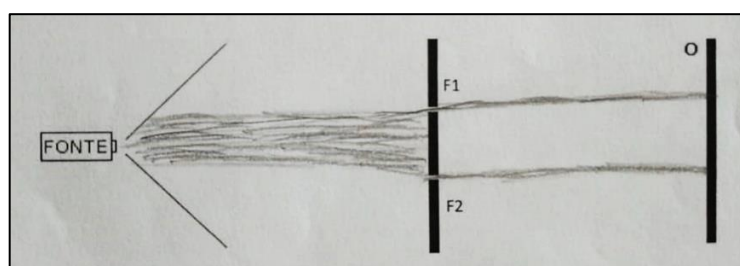
Fonte: A pesquisa.

A aluna imaginou uma representação com características pontuais para o comportamento do laser, tanto a sua linguagem verbal, quanto a gestual indicaram essa representação mental e *driver* em que o feixe não passa pelas duas fendas ao mesmo tempo. A referência à questão probabilística aparentemente não explica o surgimento das franjas claras e escuras, pois não define os padrões responsáveis pelas probabilidades das regiões marcadas no anteparo.

Neste momento podemos, ainda que de forma sutil, identificar elementos que tendem a uma postura com indícios corpusculares para a interpretação do resultado dessa configuração experimental. A interferência é vista como produto de probabilidades que definem as regiões marcadas no anteparo, não há menção sobre a divisão do feixe e nem sobre possíveis superposições de ondas com pontos construtivos e destrutivos.

Após as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*, a aluna AA2 modificou alguns elementos da sua explicação para o comportamento do feixe de luz ao longo do *setup* experimental, mas a dificuldade em explicar a interferência permaneceu, e o aspectos conceituais ondulatórios continuaram não sendo mencionados. A ilustração do feixe no esquema da dupla fenda (Fig. 114), exemplifica a ideia da aluna AA2

Figura 114 - Ilustração da aluna AA2 no teste III, para representar o feixe de luz na dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

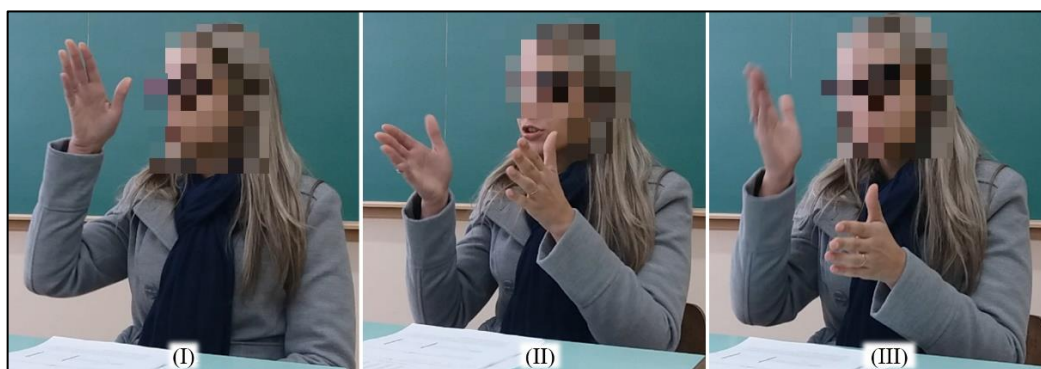
A representação do feixe não sugeriu a formação de um padrão de interferência, a aluna não considerou elementos ondulatórios para a explicação do resultado e manteve suas representações mentais e *drivers* que lembram tendências pontuais. Vejamos o seguinte trecho do segundo momento do *report aloud*, no qual a estudante buscou explicar sua compreensão dessa configuração do experimento.

AA2: Como eu imagino saindo um feixe (Fig. 115 – I) e ele vai ser repartido (Fig. 115 – II), fica melhor pra eu representar assim [franjas verticais] (Fig. 115 – III), porque está se tratando de um feixe e tem duas fendas. Mas eu imaginei o feixe, assim, como um objeto único, sabe, um raio.

Pesquisador: O feixe sai da fonte e chega nas duas fendas, o que você acha que acontece?

AA2: Na verdade, quando eu imagino o feixe, eu imagino essa situação [aponta para a Fig. 114].

Figura 115 – (I) Mão direita em movimento frontal para representar a propagação do feixe. (II) Duas mãos paralelas para sinalizar dois feixes de luz. (III) Mãos na vertical para representar as franjas de interferência.



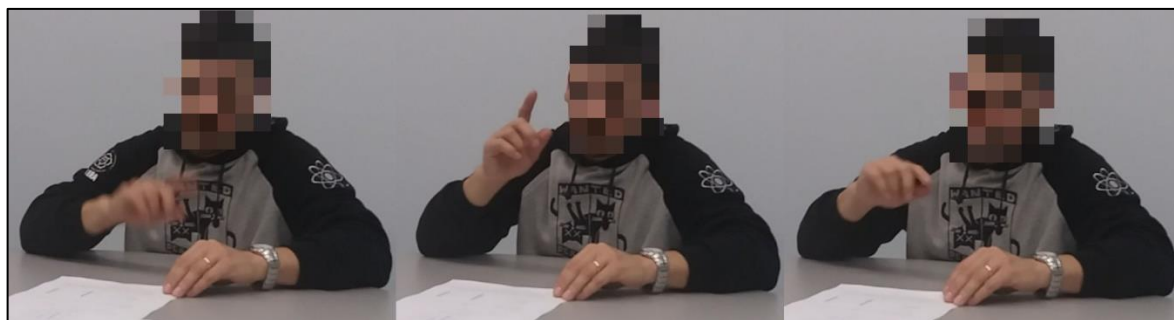
Fonte: A pesquisa.

A aluna imaginou a propagação do feixe em termos pontuais, tendo em vista a sua referência ao “*objeto único*”, ainda que indicasse a divisão do feixe, suas características após atravessar as fendas não se alteraram, e a dificuldade em explicar o surgimento do padrão de interferência permaneceu. O resultado foi acertado em todos os testes, muito pela memorização e originário das aulas que antecederam o estudo e também das simulações computacionais e *storyboards*.

O aluno AA7, por exemplo, também adotou o feixe de luz com características de onda, e foi além ao descrevê-lo com formato senoidal saindo da fonte, “*eu imaginei uma onda de luz... senoidal mesmo* (Fig. 116)” (AA7), mas ao chegar diante das duas fendas a passagem do feixe foi indicada em apenas uma, “*passou por uma [fenda] ou pela outra e formou o padrão de interferência*” (AA7), com isso, apresentou dificuldades em explicar a formação do padrão de interferência, corretamente assinalado no pós teste III após a memorização do resultado fornecido pela bancada virtual. Nessa situação, houve um conflito de representações mentais e

drivers, a postura corpuscular do licenciando não conseguiu orientar a ontologia de caráter ondulatório atribuída ao feixe de luz a fim de justificar as franjas de interferência observadas no anteparo.

Figura 116 – AA7 movimentando verticalmente o indicador da mão direita para representar uma onda senoidal.



Fonte: A pesquisa.

O aluno AA8, por sua vez, não manifestou sua inclinação de cunho corpuscular na explicação para a ocorrência do padrão de interferência neste arranjo experimental. Haja visto que, para esta situação, o feixe foi assumido com comportamento ondulatório e o padrão de interferência foi explicado classicamente através da superposição das frentes de ondas advindas das duas fendas.

Os mecanismos externos de mediação presentes no estudo contribuíram para a memorização dos resultados, mas, para essa configuração experimental, a aluna representativa AA2, por exemplo, manteve essencialmente suas concepções acerca do comportamento do feixe de luz e suas justificativas para o padrão de interferência. Cabe ressaltar que essa configuração experimental não foi abordada nos *storyboards*, os mesmos se concentraram na abordagem do experimento em regime quântico.

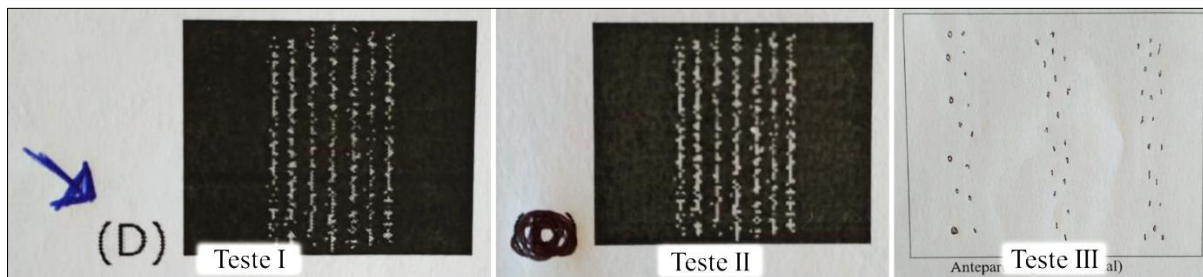
Na sequência, apresentaremos a análise sobre os resultados direcionados a dupla fenda em regime quântico.

6.5.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais.

Nesta situação experimental o padrão de interferência novamente foi previsto como resultado em todos os testes. Lembramos que a estudante AA2 pertence a IES “A” e, portanto, em seu teste I e II, o resultado foi indicado com a escolha de uma alternativa dentre cinco

possíveis. A Fig. 117 exibe o padrão desenhado no teste III, e as alternativas escolhidas nos testes I e II.

Figura 117 - Respostas da aluna AA2 para a dupla fenda operando em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

Na justificativa para a escolha da formação do padrão de interferência como resposta, nos dois primeiros testes, a aluna AA2 assumiu uma conduta corpuscular para o objeto quântico ao dissertar as seguintes frases: Teste I – “*Porque ele vai por uma fenda ou por outra, assim formando o padrão*”. Teste II – “*Porque mesmo com um observador não podemos prever a trajetória da partícula, ora ela pode passar por uma fenda, ora por outra*”. Dito isso, podemos identificar a ontologia corpuscular atribuída ao objeto quântico, mas em nenhuma das duas frases ocorreu, de fato, a explicação da ocorrência da interferência, assinalada como resposta.

No diálogo estabelecido no primeiro momento do *report aloud*, a aluna descreveu o motivo pela escolha do resultado de interferência e também comentou sobre a sua concepção acerca do comportamento do fóton e elétron no *setup* experimental

AA2: Certa vez eu lembrei de um vídeo na internet... o vídeo mostrava um elétron, o elétron saía da fonte e tinha até um cientista muito parecido com o Einstein e ele colocava uma lupa no elétron e parece que o elétron se perguntava “por onde eu vou agora?”. Aí eu lembrei que o resultado era similar a isso [padrão de interferência].

Pesquisador: O vídeo é do Doutor Quantum.

AA2: É o Doutor Quantum, isso mesmo.

De acordo com a fala da aluna, a lembrança do resultado de interferência é fruto de uma mediação cultural e hipercultural, já que surgiu do conteúdo de um vídeo acessado pela internet. O trecho seguinte da explicação, elucida a interpretação para o objeto quântico

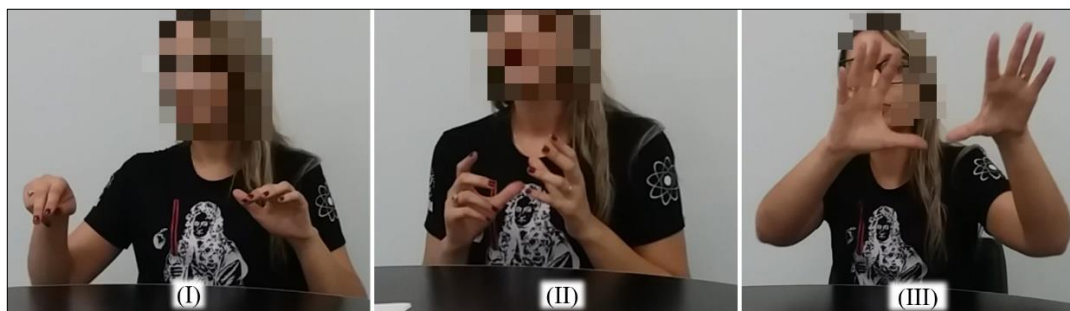
Pesquisador: Como tu me explicas o fóton saindo pela fonte?

AA2: Ele sai da fonte, daí ele se depara com duas portas, daí eu imagino ele indo em *slow motion*, em câmera lenta (Fig. 118 - I).

Pesquisador: E tu imagina ele com alguma forma?

AA2: O elétron eu imagino uma bolinha (Fig. 118 - II) com uma carinha, acho que é do próprio vídeo, mas o fóton eu imagino um nada, parece um vento indo para um lugar (Fig. 118 - III) ou para outro.

Figura 118 – (I) A aluna AA2 utilizando os dedos indicador e médio para representar o caminhar do fóton. (II) Representação de uma esfera para simbolizar o elétron. (III) As duas mãos espalmadas em movimento para sinalizar o fóton como um “vento”.



Fonte: A pesquisa.

Não somente a resposta do anteparo, mas também a caracterização do elétron foi definida graças à interação com o vídeo mencionado e permaneceu com uma ontologia corpuscular. Por outro lado, o fóton não apresentou um formato claro, pois foi associado a um vento em movimento, sem menção a uma inspiração para tal definição.

Pesquisador: E quando eles chegam nas duas fendas, acontece o que?

AA2: Ele opta por uma, ele nunca vai entrar nas duas ao mesmo tempo.

Pesquisador: Tanto o elétron quanto o fóton?

AA2: Os dois.

Pesquisador: E o que acontece no anteparo, tem algo que determina as posições que eles irão tocar o anteparo?

AA2: Não lembro muito bem, mas pra mim a única coisa que explicaria isso é a probabilidade de ele cair... a foi no caminho e caiu mais pra cá ou mais pra lá.

Este cenário construído pela licencianda evidenciou sua postura corpuscular no momento de interpretar o fóton no experimento da dupla fenda. A passagem por apenas uma das fendas e a interferência acontecendo por questões de probabilidade, ainda que não esteja claro em seu raciocínio, os elementos que determinam essa probabilidade são conjecturas que se inclinam aos princípios conceituais da interpretação corpuscular (realista). Além do mais, reforçando a não consideração do fenômeno de interferência característico ondulatório, a aluna completou “*Se tivesse interferência o fóton deveria se dividir em dois eles entrarem e se encontrarem num lugar pra um perturbar o caminho do outro... se passou só um, com quem ele vai interferir* (Fig. 119)” (AA2). Assim, um comportamento que possa se assemelhar ao ondulatório é descartado.

Figura 119 – Sequência de gestos que representam a possibilidade do fóton se dividir e depois se encontrar para ocasionar uma superposição.

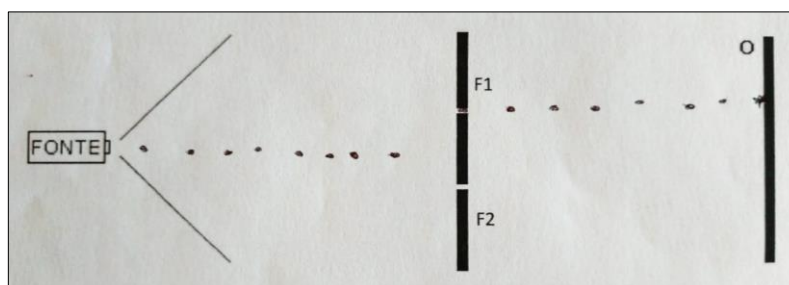


Fonte: A pesquisa.

Os gestos descritivos que simulam a divisão do fóton indicam que essas representações mentais e *drivers* podem ser previstos. No entanto, a aluna conscientemente os considerou incabíveis para a compreensão do experimento, logo, não os escolheu para explicar o padrão de interferência, evidenciando a internalização da sua interpretação corpuscular.

A imagem desenhada pela aluna AA2 no teste III (Fig. 120) para representar a evolução do elétron ao longo da dupla fenda mantém a sua concepção acerca do comportamento corpuscular do objeto quântico. O elétron foi representado por pequenas esferas passando em apenas uma das fendas mantendo sua trajetória até a colisão com o anteparo.

Figura 120 - Ilustração da aluna AA2 no teste III, para representar o elétron na dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

Para entender a formação do padrão de interferência a partir do ponto de vista da licencianda, recortamos o seguinte trecho do diálogo que faz parte do segundo momento do *report aloud*.

Pesquisador: Agora a fonte emite elétrons individuais.

AA2: Ah, daí são bolinhas, às vezes são azuis, às vezes são vermelhas.

Pesquisador: E esse padrão, por que você desenhou ele?

AA2: Porque também, ou ele vai passar por uma fenda ou por outra.

Logo ao perceber a mudança do regime de operação da fonte para elétrons individuais, a aluna já mencionou imaginá-los como pequenos corpúsculos que passam por apenas uma das

fendas. Essa mesma concepção já tinha sido apresentada pela aluna no teste II, antes da sua interação com os *storyboards*. E, ao ser novamente questionada a respeito da ocorrência do padrão de interferência, a aluna AA2 respondeu da seguinte forma:

Pesquisador: [...] E por que você acha que forma esse padrão?

AA2: Depois da última aula, eu ando em conflito comigo mesma, às vezes eu acho que pode ser que exista a transferência de *momentum* da fenda, às vezes eu acho... eu estou gostando da ideia de ter uma partícula dentro de uma onda pra explicar isso, eu não consegui ainda me posicionar.

Pesquisador: E na hora de resolver o teste, você pensou nessa forma, a onda junto com a partícula?

AA2: Não, eu pensei no caso que mais se encaixa, na transferência de momento.

Podemos observar que duas correntes interpretativas foram mencionadas na tentativa de explicar a formação das franjas claras e escuras. A licenciada afirmou estar em conflito cognitivo por ter simpatizado com duas interpretações distintas para analisar o comportamento do elétron, a corpuscular e a dualista realista, por também cogitar a possibilidade de considerar o objeto quântico com ontologia dual, sendo um corpúsculo com uma onda associada. Contudo, fica fácil perceber a interpretação que se sobressaiu na compreensão do experimento, quando a aluna AA2 confirmou na resolução do teste III ter imaginado o elétron como corpúsculo, com seu momento alterado pelas fendas possibilitando a formação do padrão de interferência no anteparo.

Ainda que não tenha mencionado com mais rigor teórico o ato da transferência de *momentum* entre as fendas e o objeto quântico, consideramos a sua interpretação privada com características análogas à interpretação corpuscular (realista), ainda que de forma incipiente, suas representações mentais e *drivers* se estabeleceram com essa postura interpretativa ao explorar o experimento da dupla fenda em regime quântico.

Em relação aos mecanismos que inspiraram e subsidiaram teoricamente a interpretação apresentada, o excerto a seguir esclarece

Pesquisador: E essa explicação que você acabou de me dar, você lembrou do que?

AA2: Das aulas [instruções didáticas]. Foram muito legais as aulas, muito mesmo. Porque quando tu estudas, tu sabes o que vai acontecer, na óptica lá, tu sabias o que ia acontecer a interferência, mas tu não sabias, não te dão ideias, fica muito abrangente pro aluno pensar o que mais encaixa, daí quando tu tem possíveis representações, né, embasadas em teorias, te dá um aparato melhor.

Desse modo, os *storyboards* foram mecanismos externos de mediação que auxiliaram a modificação das representações mentais e *drivers* de caráter corpusculares já existentes,

possibilitando que a sua lacuna conceitual sobre a causa da formação do padrão de interferência fosse preenchida.

Seguindo uma linha de raciocínio semelhante, o aluno AA7, por exemplo, também imaginou uma partícula saindo da fonte, “*passou (pelas fendas) o fóton ou o elétron, eu imagino como uma partícula* (Fig. 121 - I)”, e a sua explicação para o resultado de interferência no anteparo seguiu a ideia da não existência de um detector e da interação do elétron com as fendas e a consequente transferência quantizada de momento,

“(o elétron) *sai da fonte e passa por uma (fenda)... vai até o anteparo, e se não tiver ninguém observando, vai bater ali (na fenda), tem que ser dentro de um inteiro, um ou dois, e vai bater sempre em um ponto ali (no anteparo) formando o padrão de interferência*” (AA7).

O licenciando AA8 também manifestou sua postura corpuscular ao descrever o elétron como uma pequena partícula ao sair da fonte e, na sequência, atravessando apenas uma das fendas, “*eu penso no elétron como um pontinho (Fig. 121 - II), pontinho azul... ele sai da fonte e vai passar por uma das duas [fendas]*” (AA8). Contudo, a causa da formação do padrão de interferência não foi explicada, o aluno AA8 reportou dificuldades neste aspecto, “*eu sei que tem que dar esse padrão [de interferência], mas o que acontece nessa faixa [entre as fendas e o anteparo] eu não sei, o que faz ter interferência eu não sei*”.

Figura 121 – (I) AA7 com o punho direito fechado para representar uma pequena esfera. (II) AA8 sinalizando um pequeno corpúsculo com os dedos da mão esquerda.



Fonte: A pesquisa.

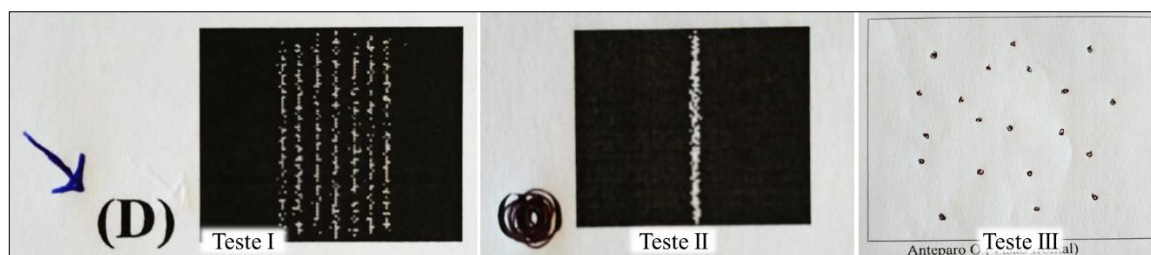
Desta forma, a linguagem gestual e verbal dos estudantes compatibilizaram, reforçando as evidências de que as representações mentais e *drivers* empregados, na tentativa de resolução do problema proposto, direcionam-se a um caráter corpuscular realista para o comportamento do objeto quântico. Percebe-se que os gestos da Fig. 121 são análogos ao realizado pela aluna representativa AA2, na Fig. 118 – II, ao retratar o elétron.

Na próxima seção, altera-se o arranjo experimental da dupla fenda com o acréscimo de um detector. Veremos, a seguir, a análise dos resultados para essa configuração do experimento.

6.5.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.

Para esta configuração experimental, a previsão dos resultados foi diferente em todos os testes, sendo que apenas no teste III a resposta foi desenhada corretamente ao indicar um padrão com pontos dispersos que não representam um padrão de interferência. A Fig. 122, abaixo, compara os três resultados escolhidos pela licencianda.

Figura 122 - Respostas da aluna AA2 para a dupla fenda operando em regime quântico com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

Observamos que mesmo no teste II, realizado após as interações com as bancadas virtuais, a resposta se diferiu da fornecida experimentalmente. À vista disso, a partir da linguagem verbal e gestual estabelecidas no primeiro momento do *report aloud*, buscamos identificar as representações mentais e *drivers* que orientaram a percepção da aluna e a sua escolha de resultados.

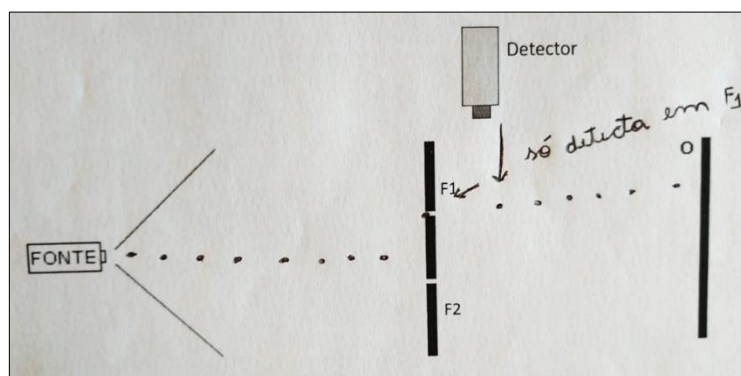
Para o teste I, a aluna mantém o padrão de interferência em razão de acreditar que o detector apenas informa a fenda em que o elétron passou, mas que o comportamento da entidade quântica permanece igual “*ah, se ele está entrando pela porta da esquerda, por exemplo, ele segue o mesmo caminho*” (AA2). Sobre a questão da existência de algum mecanismo externo que a tenha auxiliado a chegar nessa conclusão, a estudante afirmou não ter tido conhecimento dessa configuração experimental antes de participar do estudo.

No teste II, a figura escolhida como resposta indica uma franja centralizada no anteparo, de acordo com a aluna AA2, essa resposta surgiu da lembrança com a atividade das bancadas virtuais “*a posição eu não tinha bem certeza, mas quando eu fiz a simulação eu vi que se ele passava, desligasse, fechasse essa fenda aqui [aponta para o teste II], ele fosse determinado a passar em um lugar só, ele ia formar uma única linha*” (AA2). Neste caso, ocorreu um engano

entre a função do detector e a retirada de uma das fendas, aparentemente a aluna adotou uma característica de bloqueio de elétrons para o detector, associando essa função com a retirada de uma das fendas e a consequente alteração no padrão do anteparo.

Agora, vamos analisar as possíveis modificações das representações e *drivers* após as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*. Inicialmente, verificamos que o esquema (Fig. 123) representado no teste III mantém as características corpusculares ao elétron, com o detector não alterando sua trajetória.

Figura 123 - Ilustração da aluna AA2 no teste III, para representar o elétron na dupla fenda com a presença do detector.



Fonte: A pesquisa.

No segundo momento do *report aloud*, a aluna explicou sua compreensão para essa configuração experimental da seguinte forma:

AA2: O detector só vai ficar observando uma fenda, então 50% dos 100% das partículas que forem emitidas, não vão ser detectadas... o que o detector, detectar, enfim, de partículas vai ser aquilo que vai mostrar no anteparo, não sei se o termo é colapsando, ela vai seguir um padrão sem interferência, como se fosse um corpúsculo mesmo, bolinhas assim, atiradas (Fig. 124).

Figura 124 – Sequência de gestos que representam o elétron como corpúsculos emitidos pela fonte.



Fonte: A pesquisa.

A linguagem gestual confirma a representação mental e o *driver* corpuscular atribuído ao elétron. O detector foi mencionado como um mero informante que não interage com o objeto

quântico. Ao ser novamente conduzida a explicar um pouco mais suas ideias acerca da presença do detector, a aluna respondeu:

AA2: Eu imagino que ele vai ficar detectando só uma fenda, a outra ele esquece, e aquela fenda vai se comportar assim como se fosse um corpúsculo, o que tiver que passar, vai passar por ali e vai bater no anteparo e o resto simplesmente é esquecido, como se a partícula já soubesse que tem alguém espiando ela.

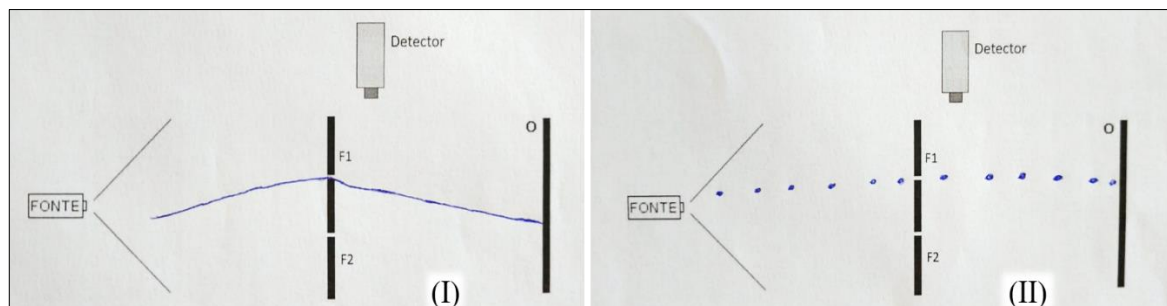
Essa explicação é semelhante a apresentada antes das instruções didáticas, ao que nos parece, a presença do detector conduziu a aluna a analisar o experimento da dupla fenda com a existência de apenas uma das fendas. E ainda completou mencionando uma possibilidade de que a partícula de alguma forma tivesse o conhecimento da presença do detector e por isso optou por atravessar justamente aquela fenda. Novamente indagada a expressar a ação do detector sobre os possíveis elementos que provocam a alteração no anteparo, a licencianda concluiu “*eu não, eu não... eu penso sempre que, sei lá, a partícula independente se for fóton ou elétron sabe... parece como se excluísse a outra fenda, como se ficasse, sei lá, não sei, sinceramente*” (AA2).

Diante deste cenário, é possível reconhecer a interpretação privada de natureza corpuscular (realista), empregada na compreensão das diferentes configurações do experimento da dupla fenda. A questão da presença do detector não foi assimilada da maneira que seu entendimento corroborasse com os princípios teóricos da interpretação corpuscular. A aluna apresentou dúvidas em suas concepções a respeito da influência de uma medida no experimento em regime quântico.

Os *storyboards* contribuíram nas modificações das representações mentais e *drivers* com tendências corpusculares já existentes, sobretudo na configuração da dupla fenda em regime quântico sem a presença do detector. Porém, uma lacuna conceitual e representacional ainda se manteve na questão em que há presença do detector, mesmo que o resultado seja previsto corretamente.

Os alunos AA7 e AA8 também expuseram dificuldades em explicar a ação do detector no arranjo experimental para ocasionar a desconstrução do padrão de interferência. Já o objeto quântico foi descrito como uma pequena partícula por ambos os estudantes, ou seja, permanecem com representações mentais e *drivers* corpusculares na compreensão do problema proposto. A Fig. 125, a seguir, exhibe a ilustração dos licenciados para representar o elétron ao longo do *setup* experimental.

Figura 125 – (I) Ilustração do aluno AA7 e (II) Ilustração do aluno AA8 no teste III, para representar o elétron na dupla fenda com a presença do detector.



Fonte: A pesquisa.

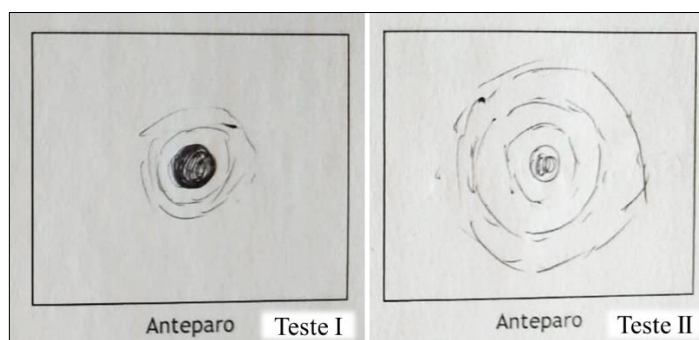
Sendo assim, a ontologia do objeto quântico permaneceu com caráter corpuscular na concepção dos dois licenciandos, independente da presença ou não de um detector. As causas conceituais que acarretam a dois resultados distintos no anteparo de visualização, com interferência e sem interferência, não foram construídas e expressadas pelos alunos AA7 e AA8, revelando, portanto, a exemplo do observado com a aluna representativa AA2, uma lacuna conceitual e representacional na questão “detector”, mesmo que o resultado seja previsto corretamente nos testes.

Prosseguindo com o movimento da análise, nas próximas seções, será dada a apresentação dos resultados expressos pela aluna AA2 para as configurações experimentais do IMZ.

6.5.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.

Lembramos que esta configuração experimental não foi abordada no teste I aplicado à turma de licenciandos da IES “A”. Porém, a situação em que a fonte é regulada para emitir um feixe de luz foi abordada nos testes II e III. A previsão do resultado a ser formado no anteparo foi correta em ambos os testes, a Fig. 126 exhibe os dois padrões de interferência desenhados.

Figura 126 - Respostas da aluna AA2 nos testes II e III, para o IMZ em regime clássico (laser).



Fonte: A pesquisa.

De acordo com a fala da aluna no primeiro momento do *report aloud*, o resultado de interferência foi “*porque eu vi na simulação*” (AA2). Ou seja, lembrança da interação com a simulação. Como justificativa para a ocorrência do padrão de interferência, a aluna utilizou a questão da probabilidade, assim como no experimento da dupla fenda. No excerto a seguir, fica mais clara a concepção da aluna que determina o comportamento do feixe de luz no IMZ.

Pesquisador: Eu quero que tu me expliques como pensou.

AA2: Probabilidade, por que é semi refletor né? Ou ele atravessa ou ele reflete, então pura probabilidade, uns vão refletir, outros vão passar.

Pesquisador: E quando você me diz, uns vão refletir, uns vão passar, o que tu imaginas para esse feixe de luz?

AA2: Ah, eu imagino como uma partícula daí... [...] fica mais fácil de um enxergar como se fossem bolinhas assim (Fig. 127 – I), bateu, tipo uma bolinha vermelha... [...] tipo uma bolinha de gude (Fig. 127 – II) ou de tênis, batendo no espelho ou atravessando (Fig. 127 – III).

Figura 127 – (I) Representação de uma pequena esfera. (II) Representação de uma bola de gude, mencionada pela aluna AA2. (III) Sinalização do corpúsculo atravessando o espelho semi refletor.



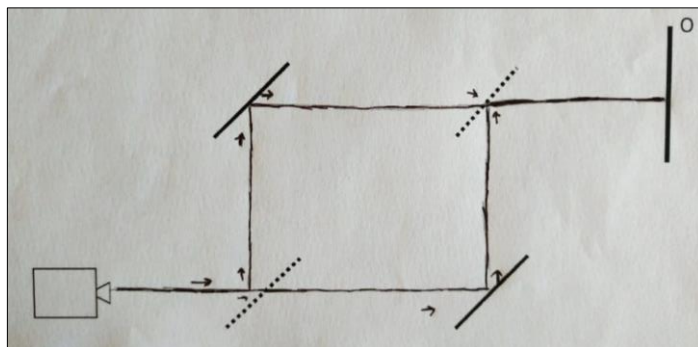
Fonte: A pesquisa.

A linguagem verbal e gestual expressada comprovam as representações mentais e *drivers* com tendências corpusculares empregados para solucionar o problema proposto. Ainda que o experimento trate de um feixe de luz e tenha como resultado o padrão característico de um fenômeno ondulatório, a aluna utilizou princípios corpusculares para explicar esta configuração do IMZ.

A aluna manteve a ideia de que o feixe sob a forma de corpúsculos toma um caminho ou outro no IMZ, isto é, refrata ou reflete nos espelhos semirrefletores, e o padrão de interferência aparece devido a questões probabilísticas que não eram de conhecimento da aluna, “*é probabilidade, mas eu não sei explicar, nunca li a respeito de porque acontece isso, mas eu acho que é probabilidade*” (AA2).

Na resolução do teste III, após o estudo com os *storyboards*, a aluna AA2 desenhou a seguinte representação para o feixe de luz no IMZ (Fig. 128). Olhando apenas para a ilustração, o feixe de luz foi representado por um uma linha reta (lembrando um laser pontual) e não mais por corpúsculos, como os mencionados anteriormente pela licencianda.

Figura 128 - Ilustração da aluna AA2 no teste III, para representar o feixe de luz no IMZ.



Fonte: A pesquisa.

A aluna AA2 alterou completamente sua percepção acerca do feixe de luz no momento de explicar o resultado indicado no teste III. Os recortes a seguir exemplificam a interpretação adotada:

AA2: Eu sei que tem que dar esse resultado [pela simulação]. Então eu imagino que saia um feixe aqui da fonte.

Pesquisador: E como tu imaginas esse feixe?

AA2: É um raio laser vermelho, e nesse semirrefletor, daí o feixe vira dois, um vai para a esquerda (Fig. 129 – I) e o outro vai ir reto (Fig. 129 – II), depois ele vai refletir, um raio que virou dois e eles vão se juntar no último espelho semirrefletor.

Pesquisador: E pra essa explicação que você acabou de dar, lembrou de alguma coisa?

AA2: Não... eu nem sabia que existia um espelho semirrefletor.

Figura 129 – (I) Mão esquerda em movimento para representar a reflexão de uma porção do feixe. (II) Dedo indicador da mão direita em movimento lateral sobre a mesa para sinalizar uma porção do feixe refratando no espelho semirrefletor.



Fonte: A pesquisa.

Neste caso, a aluna AA2 expôs pela primeira vez representações mentais e *drivers* com inclinações ondulatórias, tanto a linguagem verbal quanto a gestual evidenciam a interpretação utilizada, na qual o feixe de luz se divide e depois se superpõe para ocasionar o padrão de interferência. A partir do diálogo estabelecido, não foi possível identificar quais mecanismos externos de mediação foram responsáveis por incentivar essa mudança interpretativa, já que a aluna afirmou não ter lembrado de nada que pudesse conduzi-la a pensar desta forma.

Como os *storyboards* foram as ferramentas de mediação, com conteúdo direcionado aos experimentos e observados pela aluna no período de intervalo entre o primeiro e o segundo momentos do *report aloud*, podemos cogitar que as representações presentes tenham, ainda que indiretamente, influenciado essas alterações nas representações mentais e *drivers* modelizados para resolver o problema proposto.

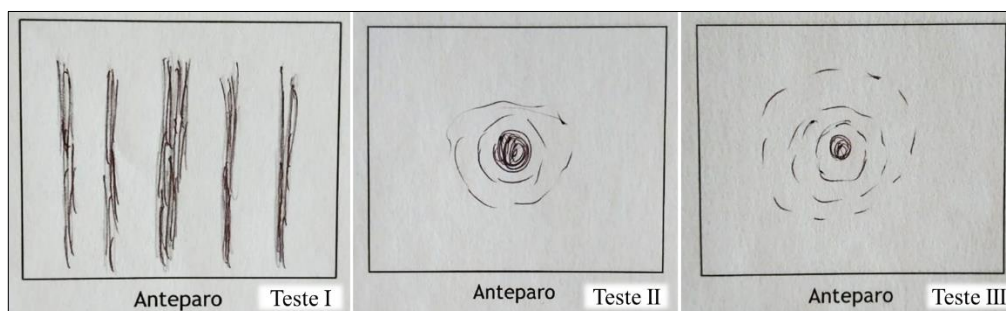
Para esta configuração experimental, os alunos AA7 e AA8 definiram o feixe de luz com comportamento ondulatório clássico, contudo, suas representações mentais e *drivers* não foram suficientes para justificar o resultado de interferência, previsto corretamente pelo aluno AA7 e incorretamente pelo AA8. Desse modo, o licenciando AA7, por exemplo, indicou a divisão do feixe de luz no primeiro espelho semirrefletor e sua posterior união, porém, sem causar as franjas de interferência. Por outro lado, o aluno AA8 mostrou acreditar na indivisibilidade do feixe de luz, o qual percorreria apenas um dos caminhos do IMZ, formando o padrão de interferência por um determinado motivo que o próprio estudante mencionou não saber explicar.

Na sequência, serão analisados os resultados sobre o IMZ operando em regime quântico.

6.5.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.

Para o IMZ operando em regime quântico, a previsão correta da formação do padrão de interferência aconteceu nos três testes. A Fig. 130, abaixo, traz a comparação dos desenhos que correspondem aos resultados sinalizados nos testes pela aluna AA2.

Figura 130 - Respostas da aluna AA2 para o IMZ operando em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

No teste I, a explicação para a ocorrência do padrão de interferência foi descrita da seguinte forma: “*Haverá um padrão de interferência. Um fóton pode tomar o caminho da esquerda e chegar ao anteparo, já outro, pode seguir reto e também chegar ao anteparo*” (AA2). De acordo com a explicação, pode-se reconhecer um princípio de viés corpuscular adotado para designar o comportamento do fóton, tendo em vista a percepção da sua não divisão

no espelho semirrefletor. Nesta passagem recortada do teste I, não foram apresentados elementos que demonstrassem as causas para a formação da interferência.

No primeiro momento do *report aloud*, a licencianda manifestou sua compreensão para os resultados dos testes I e II, com sentenças que se aproximam da interpretação corpuscular realista.

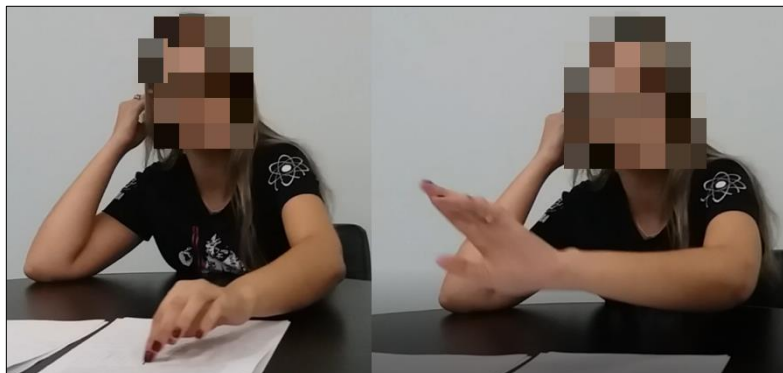
Pesquisador: E se fosse me explicar o caminho percorrido, tu imaginas o que saindo da fonte?

AA2: Ah, uma bolinha de novo, a mesma coisa que a anterior [fonte emitindo um feixe], só que ali eram várias bolinhas, todas indo assim, juntinhas. Agora é uma bolinha, e essa bolinha ou atravessa e quica e bate lá no final (Fig. 131), ou ela bate aqui, bate aqui [apontando para o esquema do IMZ] e atravessa.

Pesquisador: E sabe me dizer por que ele marca o anteparo nesses pontos?

AA2: É probabilidade, chegou nessa parte, que eu não sei explicar, a única coisa que vem na minha cabeça e seria possível é a probabilidade.

Figura 131 – Representação do fóton percorrendo um dos caminhos do IMZ.



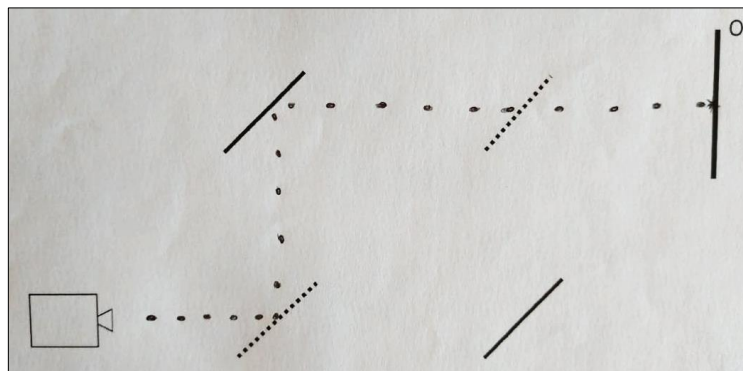
Fonte: A pesquisa.

Deste modo, as representações mentais e *drivers* de carácter corpuscular manifestados para explicar o comportamento do objeto quântico no *setup* experimental foram identificados por meio da linguagem verbal e gestual. Neste tocante, o fóton foi assumido como um corpúsculo que segue um dos caminhos possíveis até chegar no anteparo em posições que, segundo a aluna AA2, são definidas por meio de algum fator probabilístico. Assim, a probabilidade torna-se a figura que se enquadra nas explicações das interferências, mesmo não sendo compreendida.

Em relação às possíveis mediações que podem ter inspirado a aluna a adotar essa interpretação privada para esse caso do experimento, a mesma disse não ter observado tal explicação em nenhum lugar.

Na resolução do teste III, a postura corpuscular realista se manteve, no esquema da Fig. 132, a representação para o fóton ao longo do IMZ toma formas esféricas indivisíveis, características de um corpúsculo.

Figura 132 - Ilustração da aluna AA2 no teste III, para representar o fóton no IMZ.



Fonte: A pesquisa.

Durante o segundo momento do *report aloud*, a aluna AA2 considerou um comportamento corpuscular para o fóton, o mesmo foi emitido pela fonte em forma de “bola... azul ou vermelha” (AA2) e, ao chegar no espelho semirrefletor, esse corpúsculo “vai tomar um caminho ou vai tomar outro” (AA2). Até este momento, a interpretação do experimento foi semelhante à adotada antes das instruções didáticas com os *storyboards*. Porém, quando questionada sobre as causas da formação do padrão de interferência, isto é, os fatores que determinam as regiões em que o fóton marca o anteparo, a aluna acrescentou um novo elemento com propriedades ondulatórias ao seu argumento. O excerto, a seguir, revela essa nova perspectiva.

AA2: Eu sei que forma o padrão de interferência, se eu tiver que pensar porque ele [fóton] cai num ponto e não no outro, eu vou te responder que tem uma onda associada.

Pesquisador: E tu pensou nisso na hora de responder o teste?

AA2: Não, só agora. Se é satisfatória a explicação com o corpúsculo, eu nem penso na outra. Porque eu sei o resultado.

Pesquisador: E pra essa situação, com o corpúsculo é satisfatório, tu consegue explicar a interferência?

AA2: Pra mim fica bom, mas agora refletindo, não sei se pra outra pessoa vai ficar, porque o padrão de interferência é de uma onda.

Pesquisador: Mesmo sabendo que é característica de uma onda, tu imaginas um corpúsculo?

AA2: Sim.

Pesquisador: E se eu te perguntar por que ele cai num ponto do anteparo e não em outro?

AA2: Daí eu vou dizer assim: ah, na verdade tem uma onda associada, e eu vou começar a desenhar um monte de ondazinhas aqui em cima das partículas.

Pesquisador: E se tu tivesses que ter uma escolha, a primeira é sempre com corpúsculo?

AA2: Sempre com corpúsculo.

Em resumo, a interpretação corpuscular foi a primeira a ser acessada pela aluna para a resolução do problema proposto. Ou seja, quando levada a explicar o comportamento de um objeto quântico no IMZ, as primeiras representações mentais e *drivers* empregados foram os de

caráter corpuscular, o elétron ou fóton são partículas indivisíveis com trajetórias bem definidas. De acordo com a linguagem verbal expressada, caso o motivo da formação do padrão de interferência não fosse questionado, a aluna simplesmente previu corretamente o resultado devido às memorizações com a bancada virtual. Entretanto, quando a origem da interferência entrou em pauta, a licencianda reconheceu que as suas representações e *drivers* com inclinações corpusculares não davam conta de solucionar a situação, conseqüentemente, essas representações e *drivers* se modificaram e, ao objeto quântico, foi acrescentada uma onda associada, sendo essa uma tendência da interpretação dualista realista.

Como a questão da formação do padrão de interferência é um ponto dificultoso quando analisado sob o ponto de vista corpuscular, a aluna acessou as representações observadas nos *storyboards* para acrescentar características de onda ao corpúsculo e desta forma relacioná-lo com a interferência, que é um fenômeno de caráter ondulatório. Podemos considerar essa alteração interpretativa como uma modelização científica do comportamento do objeto quântico embasada nas instruções didáticas, mesmo que ainda apresente uma abrangência teórica superficial.

Essa situação, por exemplo, também foi observada no raciocínio do aluno AA7, haja visto a adição de fundamentos ondulatórios em suas representações e *drivers* essencialmente corpusculares. Isso significa que o fóton, ao sair da fonte, é tido como um pequeno corpúsculo, “*imagino como um corpúsculo...circular*” (AA7), e, ao chegar no primeiro espelho semirrefletor, se divide e passa a percorrer os dois caminhos do IMZ simultaneamente, “*ele [fóton] se divide*” (AA7), sendo essa a inclusão de características de cunho ondulatório na tentativa de justificar o padrão de interferência no anteparo. Porém, não houve outras menções acerca das causas teóricas para a ocorrência das franjas claras e escuras, como superposições construtivas e destrutivas, por exemplo.

Em contrapartida, o aluno AA8 manteve sua definição ontológica corpuscular para o fóton, considerando-o indivisível no *setup* experimental, isto é, ou é transmitido ou refletido pelos espelhos semirrefletores, seguindo apenas um dos caminhos “*ou ele [fóton] passa ou ele desvia*” (AA8). Desta forma, a formação das franjas de interferência não foi explicada pelo licenciando, suas conjecturas construídas sob as perspectivas da interpretação corpuscular não foram suficientes para justificar o resultado desse arranjo do experimento.

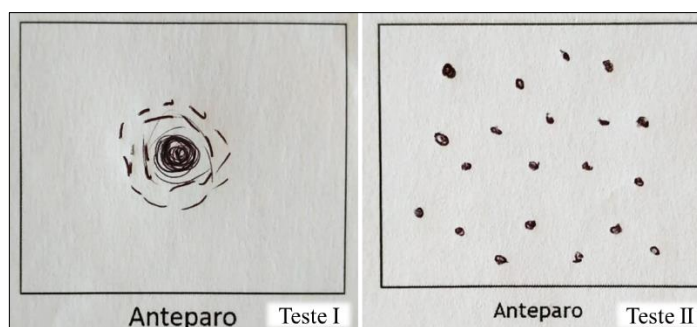
Dando prosseguimento à análise dos resultados, na próxima seção, abordaremos a terceira e última configuração experimental do IMZ, quando a fonte opera em regime quântico com a presença de um detector.

6.5.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.

A exemplo da análise realizada sobre os resultados da aluna AA1, nesta seção serão investigadas as representações mentais e *drivers* utilizadas para identificar a interpretação privada e a modelização científica nos testes II (aplicado após as bancadas virtuais) e III (aplicado após os *storyboards*), pelo fato da aluna AA2 também pertencer ao grupo da IES “A”, no qual o teste I aplicado não abordou de forma direta a previsibilidade do resultado do padrão a ser formado no anteparo para a situação em que o IMZ opera em regime quântico com a presença de um detector.

A previsão correta da não formação do padrão de interferência só aconteceu no teste III. No teste II, a resposta indicada no anteparo foi da ocorrência de um padrão de interferência, sendo esse um resultado teoricamente inconsistente. A Fig. 133 apresenta as ilustrações realizadas nos anteparos dos testes.

Figura 133 - Respostas da aluna AA2 nos testes II e III, para o IMZ em regime quântico com a presença do detector.

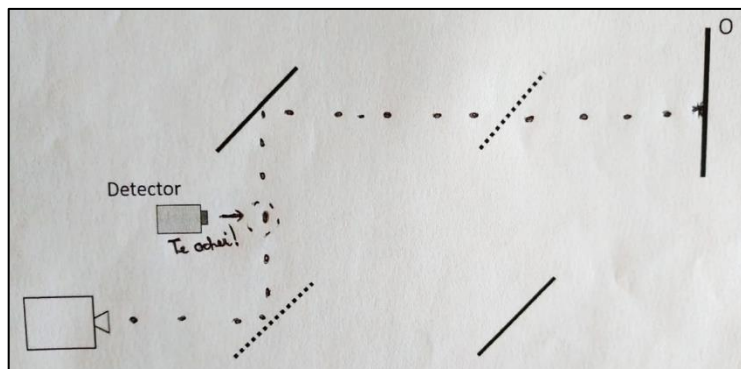


Fonte: A pesquisa.

Como explicação para a resposta do teste II, em que a figura no anteparo se aproxima a de um padrão de interferência, “*meu desenho é de uma leve interferência*” (AA2), a aluna assumiu o fóton com comportamento corpuscular em todo seu percurso no IMZ. Logo, novamente surgiu a dificuldade em justificar as posições marcadas no anteparo, fazendo com que a aluna recorresse à questão da probabilidade “*o detector vai detectar só os que estão passando pra cá [indicando um caminho do IMZ], ele não tem que detectar os que estão passando por aqui [indicando outro caminho do IMZ, então vai ser 50%, probabilidade*” (AA2). A partir dessa afirmação, não se pode aferir as causas imaginadas para explicar o resultado, que de acordo com a aluna, foi fruto da lembrança da bancada virtual.

Na resolução do teste III, a aluna manteve sua interpretação privada essencialmente corpuscular ao representar o fóton como pequenas partículas indivisíveis ao longo do *setup* experimental do IMZ, como mostra a Fig. 134.

Figura 134 - Ilustração da aluna AA2 no teste III, para representar o fóton no IMZ.



Fonte: A pesquisa.

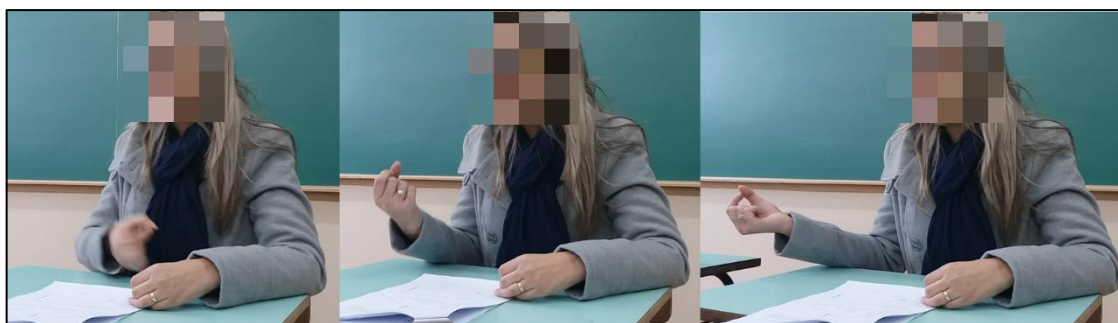
A linguagem verbal e gestual empregadas no segundo momento do *report aloud* evidenciaram as representações mentais e *drivers* com características realistas e corpusculares. De acordo com a licencianda, o padrão disperso no anteparo representando a não formação de interferência foi a resposta memorizada devido às instruções didáticas e ao *software*, “*lembrei das aulas e do simulador*” (AA2). O recorte do diálogo elucidava a interpretação adotada para compreender e explicar o resultado para este caso do IMZ.

AA2: Eu sei que miraculosamente ele [fóton] prevê que tem um detector e ele não forma o padrão [de interferência], deve ser brincadeira dessas partículas, alguma coisa assim, mas eu sei que não vai formar, e daí a partir do resultado que eu sei, eu vou montar o que eu mais me sinto à vontade e daí como falava em um elétron ou fóton, é uma unidade, então eu desenho uma unidade, uma bola indo (Fig. 135), daí ela é detectada, e o detector só vai detectar aquelas que vierem pelo caminho dele

Pesquisador: E tu consegue imaginar alguma interação desse detector com a partícula que faça com que ela rume para qualquer ponto no anteparo.

AA2: Não, eu acho que a partícula sabe, o detector está ali, ele não sabe de nada, mas ela [partícula] sabe [...] E aqui não precisa falar em onda.

Figura 135 – Representação, com a mão direita, do movimento de um objeto quântico na forma esférica.



Fonte: A pesquisa.

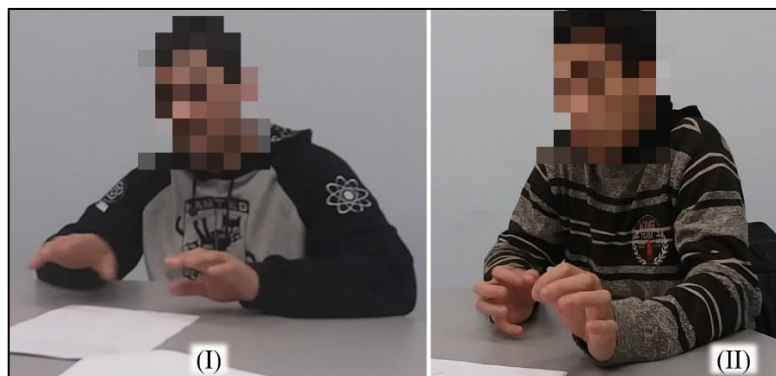
Neste momento, a aluna AA2 abandonou a questão da probabilidade, pois já se recordava do resultado correto para essa configuração do experimento. Tanto o fóton quanto o elétron foram tomados como corpúsculos indivisíveis e com trajetórias bem definidas, que de alguma forma têm consciência da presença do detector e, portanto, rumam para qualquer ponto do anteparo, desconstruindo o padrão de interferência.

A ontologia do objeto quântico na concepção da estudante se aproximou dos fundamentos da interpretação corpuscular realista. Entretanto, a influência do detector sobre a partícula não foi compreendida com a mesma orientação teórica pela aluna, que não mencionou pontos relacionados ao princípio da incerteza, por exemplo. Com base nessa ótica, a modelização científica instintiva fundamentou-se sob mais influência da interpretação corpuscular realista, na qual as bancadas virtuais e *storyboards* direcionados à dupla fenda reforçaram as representações mentais e *drivers* aparentemente já existentes na estrutura cognitiva da licencianda AA2.

Na concepção do aluno AA7, por exemplo, o fóton na figura de um corpúsculo se divide ao passar pelo espelho semirrefletor. Dito isto, a parcela que segue pelo caminho onde há o detector, sofre uma alteração, “*eu imaginei que espalhou mais, o feixe... o fóton porque tem uma influência do observador e daí ele acabou espalhando mais* (Fig. 136 – I)” (AA7), e, como consequência, acaba ocasionando a alteração do resultado no anteparo. Assim, pode-se identificar um conflito de representações mentais e *drivers*, basta ver que a tendência corpuscular intuitiva empregada, ainda de forma incipiente, mesclou-se com propensões ondulatórias, não se mostrando suficientes no raciocínio para explicar a ação do detector e a não construção do padrão de interferência prevista no teste III.

Por outro lado, o licenciando AA8 não previu corretamente o resultado de não interferência nesta configuração experimental. Nas palavras do aluno, o detector “*é a mesma coisa [da situação sem detector], a única coisa [diferente] é que o detector avisa se ele passou aí ou desviou*” (AA8), não alterando o seu comportamento manifestado na ausência da medição, isso quer dizer que as representações e *drivers* seguem o caráter corpuscular “*é um ponto, um pontinho né* (Fig. 136 - II), *ele [fóton] vem, ou ele passa ou desvia [ao chegar no primeiro espelho semirrefletor]*” (AA8), e a causa da formação das franjas de interferência no anteparo continuou atingindo um grau de incompreensibilidade.

Figura 136 – (I) AA7 sinalizando a influência do detector no objeto quântico. (II) AA8 descrevendo o fóton como um pequeno corpúsculo, com os dedos da mão esquerda.



Fonte: A pesquisa.

Na sequência, apresentaremos a apreciação dos dados relacionados ao aluno representativo chamado de “AB13”, escolhido para representar o grupo de estudantes inclinados à Interpretação Dualista Positivista durante o entendimento e a justificativa dos resultados observados nas diferentes configurações dos experimentos virtuais.

6.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO GRUPO DUALISTA POSITIVISTA – O LICENCIANDO AB13 COMO ALUNO REPRESENTATIVO.

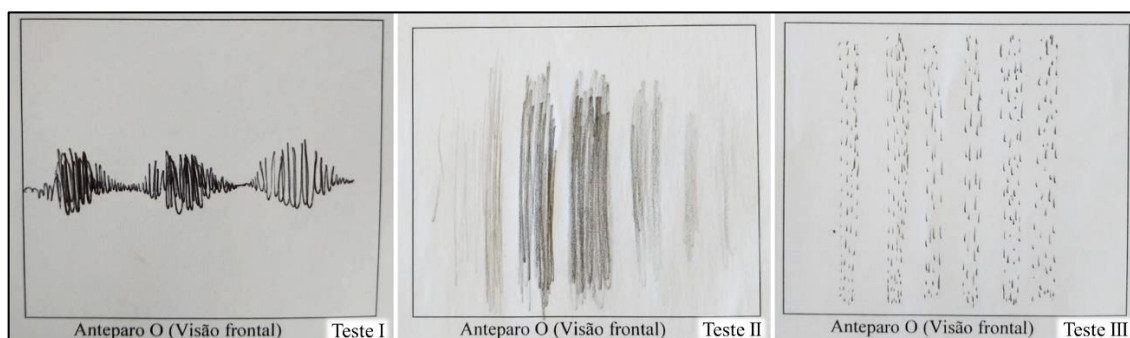
O licenciando AB13 compõe o grupo de estudantes vinculados a IES “B”. Sendo assim, fez parte da segunda turma que realizou todas as etapas do experimento deste estudo. Salientamos que essa escolha ocorreu pelo fato do aluno AB13, de acordo com nosso entendimento, ter expressado representações mentais e *drivers* com mais perspectivas à interpretação dualista positivista quando comparado aos demais estudantes com inclinações a mesma corrente interpretativa. Em outras palavras, o estudante AB13, durante a compreensão e explicação dos resultados das diferentes configurações experimentais da dupla fenda e do IMZ, revelou tendências conceituais próximas às conjecturas estabelecidas pela natureza dualista positivista, sendo que essas proposições externalizadas, quando comparadas as dos demais sujeitos enquadrados nesse grupo interpretativo, manifestaram-se com mais ênfase. Também foram reconhecidos outros dois licenciandos com posicionamento correspondente, incluídos neste grupo interpretativo, são eles: AA4, AB14 e AB17.

Mantendo a estrutura da análise, iniciaremos a leitura dos dados a partir dos resultados vinculados aos diferentes arranjos do experimento da dupla fenda, com a primeira composição identificada pela operação em regime clássico, em que a fonte está regulada para emitir um feixe de luz.

6.6.1 O experimento da dupla fenda: operação em regime clássico – feixe de luz.

Para esta configuração do experimento da dupla fenda, as previsões dos resultados nos três testes sinalizam a formação de um padrão de interferência no anteparo. Embora a figura desenhada no teste I (Fig. 137) se diferencie das dos demais testes, de acordo com o aluno AB13, o significado é essencialmente o mesmo, demonstrar a constituição da interferência.

Figura 137 - Respostas do aluno AB13 para o a dupla fenda emitindo um feixe de luz.

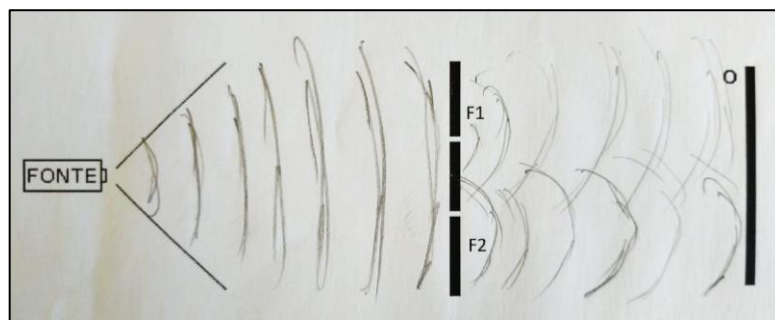


Fonte: A pesquisa.

Segundo a descrição do licenciando no teste I, o resultado foi baseado em leituras anteriores ao próprio ingresso ao curso de física: “*Há muito tempo visualizei um experimento parecido em um livro. Não recordo exatamente a literatura, mas no momento tudo parecia muito coeso descrevendo a imagem*” (AB13). No teste II, as franjas claras e escuras são representadas na vertical devido à interação com a bancada virtual, que em seu *layout* gráfico fornece essa forma de imagem.

Em ambos os testes que antecedem as instruções didáticas, a explicação do aluno AB13 seguiu uma dinâmica ondulatória, o feixe de luz foi imaginado como ondas circulares saindo da fonte que ao passarem pelas fendas, dividem-se originando duas novas frentes de ondas. A ilustração a seguir (Fig. 138), esboça a esquematização realizada pelo licenciando ao descrever o feixe de luz no *setup* experimental.

Figura 138 - Ilustração do aluno AB13 no teste II, para representar o feixe de luz na dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

Essas representações e *drives* de cunho ondulatório também foram reveladas na linguagem verbal e gestual presente no primeiro momento do *report aloud*. Os excertos, a seguir, precisam as suas externalizações.

Pesquisador: Como tu imaginas o feixe de luz saindo da fonte?

AB13: Como se fosse a simbologia do *Wi-fi* (Fig. 139 – I).

Pesquisador: E quando chega na frente das duas fendas, acontece o que?

AB13: Então vamos dar um *zoom* né ... quando a gente dá o *zoom*, eu tô passando ele pela fenda, a gente tem as ondas passando, só que fazendo aquele (Fig. 139 – II) ... como se aqui [apontando para o testes] tivessem mais duas fontes, digamos assim, eu dupliquei as fontes, pra mim tem sentido.

Figura 139 – (I) Sequência de movimentos com ambas as mãos para representar uma onda circular a partir da analogia com a ilustração que representa a rede *wifi*. (II) Duas frentes de ondas após a passagem pelas fendas.



Fonte: A pesquisa.

Os gestos descritivos juntamente com a linguagem verbal do aluno AB13 são indicativos das representações mentais e *drivers* ondulatórios. As inspirações dessa interpretação para o feixe de luz na dupla fenda foram documentários, vídeos disponíveis no *YouTube* e o livro “O Universo Elegante - Brian Greene”, “*eu não consigo te dar uma precisão de o que eu vi no livro ou o que eu vi nos documentários, mas todos eles remetiam sempre a mesma ideia*” (AB13).

Frente ao exposto, podemos identificar que as representações mentais e *drivers* com tendências ondulatórias empregadas na compreensão dessa configuração experimental da dupla fenda, até o momento, foram resultantes sobretudo das mediações sociais e culturais espelhadas

pelo livro mencionado e pelas séries de documentários e vídeos disponíveis na internet. Neste caso, a bancada virtual como mecanismo externo de mediação hipercultural somente reforçou o resultado já conhecido para o anteparo.

Na construção da explicação do resultado de interferência indicado no teste III, o aluno AB13 manteve suas concepções ondulatórias para o comportamento do feixe de luz no experimento. A principal alteração percebida na atitude do licenciando, após a interação com os *storyboards*, foi a atenção para a presença ou não de um detector no arranjo experimental antes de iniciar sua análise a respeito do resultado do anteparo. O trecho a seguir destaca essa reflexão.

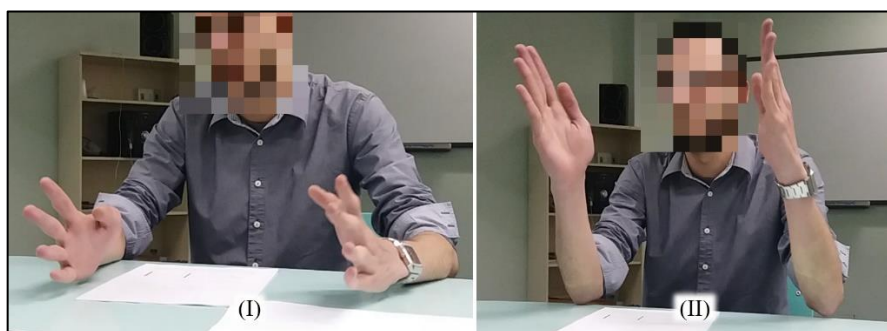
Pesquisador: Por que tu desenhaste esse padrão?

AB13: No primeiro momento eu analisei que o experimento não estava sendo observado, aí na minha cabeça, feixe de luz já se comporta como onda, e o que eu vou ver no anteparo é um padrão de interferência.

Pesquisador: E por que forma esse padrão de interferência?

AB13: Porque como você tem a dupla fenda (Fig. 140 – I), você tem duas fontes de onda né, depois dessa dupla fenda, e dessas fontes de onda (Fig. 140 – II) você tem interferências construtivas e destrutivas e o padrão é formado.

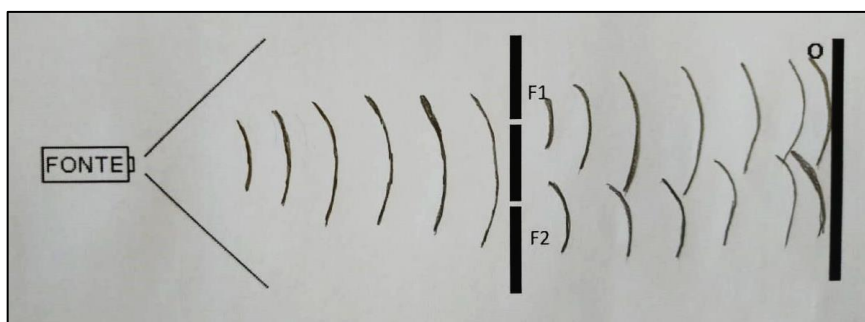
Figura 140 – (I) Mãos paralelas próximas a mesa para representar as fendas. (II) Mãos paralelas levadas ao alto, para sinalizar as duas frentes de ondas a serem formadas após as fendas.



Fonte: A pesquisa.

O esquema ilustrado a seguir (Fig. 141), representado pelo licenciando, repete a ilustração da Fig. 138 e corrobora com a sua linguagem verbal e gestual manifestada no segundo momento do *report aloud*. O feixe de luz é sinalizado na forma de ondas circulares que passam pelas fendas, dividem-se e interferem-se ao chegar no anteparo.

Figura 141 - Ilustração do aluno AB13 no teste III, para representar o feixe de luz na dupla fenda.

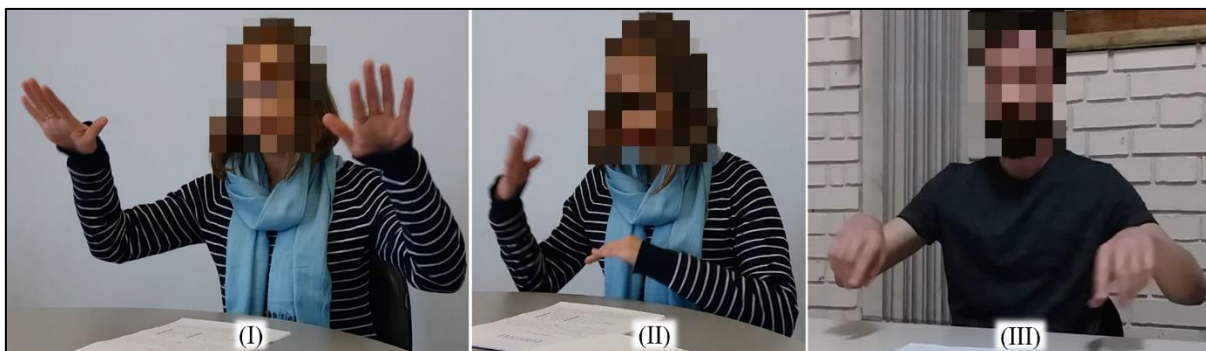


Fonte: A pesquisa.

Desta forma, verificamos que a análise acerca da possível presença do detector foi um ponto em destaque acrescentado na interpretação seguida pelo aluno AB13. Essa especulação *a priori*, que antecede a descrição do experimento foi aparentemente fomentada pelas instruções didáticas com os *storyboards*. Ainda que de forma incipiente, podemos considerar indícios de uma interpretação privada que se assemelha a orientação dualista positivista, tendo em vista o exame inicial da configuração do arranjo experimental e conseqüentemente o resultado a surgir no anteparo, para em seguida expressar o comportamento do laser, mesmo que essa configuração experimental seja considerada um sistema clássico.

Para essa configuração experimental em regime clássico, o feixe de luz também foi descrito com um comportamento essencialmente ondulatório pelos licenciandos AA4, AB14 e AB17. Assim, o padrão de interferência foi justificado por meio das superposições das porções de ondas oriundas das duas fendas. Quanto à caracterização do feixe de luz, a aluna AA4, por exemplo, imaginou “*ondas se espalhando [semi-circulares]*” (Fig. 142 – I)” (AA4), e a interferência surgiu pelo fato de a “*onda passar pelas duas fendas e interfere crista e vale*” (Fig. 142 – II)” (AA4). O aluno AB17, por exemplo, também indicou o feixe de luz sob a forma de ondas circulares, semelhante a “*ondas em uma cuba de água*” (AB17), que atravessam as duas fendas, “*de uma onda, acabam surgindo duas, como se tivessem duas fontes aqui [apontando para as fendas], emitindo duas ondas*” (Fig. 142 – III) e *uma acaba interferindo na outra*” (AB17), formando, então, as franjas claras e escuras observadas no anteparo.

Figura 142 – (I) AA4 representando ondas semi-circulares. (II) AA4 sinalizando com ambas as mãos as cristas e vales de uma onda. (III) AB17 indicando com as duas mãos as frentes de onda provenientes das fendas.



Fonte: A pesquisa.

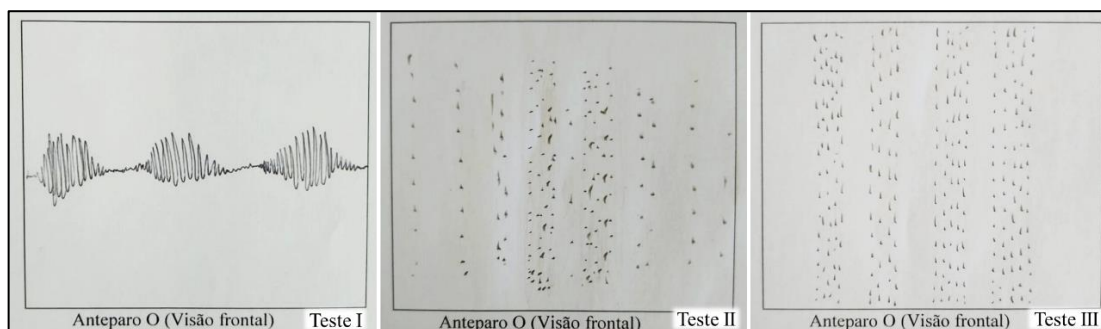
Como a fonte não estava em regime monofotônico, os alunos AA4, AB14 e AB17 não se detiveram na questão do observador e previsibilidade de resultados, utilizaram intuitivamente as representações mentais e *drivers* clássicos para satisfazer suas explicações, sem conflitos conceituais aparentes.

Continuando com o curso da análise, na próxima seção, trataremos dos resultados direcionados ao aparato experimental da dupla fenda com a fonte operando em regime quântico.

6.6.2 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico – elétrons individuais.

A previsibilidade dos resultados nos anteparos dos três testes, novamente, se manteve correta. Em todas as ocasiões, o padrão de interferência foi representado como resposta. A Fig. 143 exibe os desenhos feitos pelo aluno AB13 nos testes. Podemos observar que os resultados para a dupla fenda em regime quântico foram desenhados de forma bastante semelhante aos seus respectivos testes para o caso do feixe de luz.

Figura 143 - Respostas do aluno AB13 para o a dupla fenda em regime quântico.



Fonte: A pesquisa.

A opção pela escolha do padrão de interferência no teste I também proveio da mediação social e cultural na forma de livros, uma vez que o licenciando escreveu a seguinte justificativa:

“Na minha concepção adquirida através de livros, o fóton pode se comportar como uma partícula ou uma onda. Como temos as fendas, o comportamento é de uma onda” (AB13).

No entanto, ao longo do *report aloud*, a descrição dos objetos quânticos seguiu características corpusculares. Até ocorreu a menção de que, para um fóton, a possibilidade de imaginá-lo como onda é mais confortável do que a do elétron, mas no momento da resolução do teste II, por exemplo, os objetos quânticos foram imaginados como corpúsculos, e o padrão de interferência ocorreu devido a questões probabilísticas que envolveram a interação da partícula com as fendas. Vejamos os excertos que reproduzem essa compreensão do licenciando para esta configuração do experimento.

Pesquisador: Como tu imagina esse elétron saindo da fonte?

AB13: Eu imagino saindo uma partícula (Fig. 144)

Pesquisador: Alguma cor?

AB13: Vermelha.

Figura 144 – Sinalização de uma pequena esfera para representar o elétron.



Fonte: A pesquisa.

A linguagem gestual confirma a representação mental do elétron com caráter corpuscular determinado por um corpúsculo esférico bem definido e coloração avermelhada. Seguindo com a explicação, temos:

Pesquisador: E quando chega nas duas fendas?

AB13: Neste caso aqui... o elétron poderia bater na fenda... depois de muito tempo provavelmente vai ter um elétron que vai sair, vir nessa direção [apontando para o teste], passar pela fenda e bater aqui [anteparo], aí outro elétron ele sai, pega aqui no cantinho da fenda e pode ser que tenha um ricocheteio.

Pesquisador: Mas tu não acreditas que ele se divida e passe pelas duas fendas?

AB13: Não.

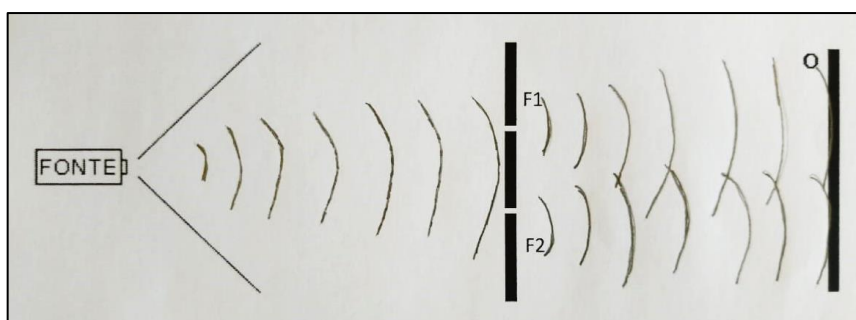
Pesquisador: E por que forma este padrão de interferência?

AB13: Uma pela questão do tempo que a fonte está ligada e outra e a passagem nas fendas... eu acho que a questão está mais relacionada com o elétron ricochetear nas fendas do que se dividir...

De acordo com sua linguagem verbal, o aluno manifestou explicitamente uma tendência corpuscular ao descrever o comportamento do elétron no *setup* experimental da dupla fenda. A possibilidade de divisão dos objetos quânticos ao passar pelas fendas já foi observada em vídeos, mas não aceita pelo aluno “*eu lembro partes desse vídeo, que ele se divide nessa fenda, e eu falei, não, não pode ser!*” (AB13). O aluno só cogitaria esse comportamento ondulatório para o fóton, mesmo assim, afirmou não acreditar na sua divisão.

Após as instruções didáticas, no segundo momento do *report aloud*, o aluno AB13 modificou suas representações mentais e *drivers*, alterando-os para uma tendência ondulatória ao descrever o comportamento do elétron no experimento da dupla fenda. A atenção com a possível presença de um detector também foi um fator relevante sob o ponto de vista interpretativo, que surgiu nessa segunda explicação. A Fig. 145 exibe a ilustração desenhada no teste III, que esboça esse comportamento do elétron com propensões ondulatórias no experimento.

Figura 145 - Ilustração do aluno AB13 no teste III, para representar o elétron na dupla fenda.



Fonte: A pesquisa.

Essa representação se assemelha à adotada para o feixe de luz (Fig. 141). Neste caso, o elétron também foi definido na forma de ondas circulares que atravessa as duas fendas, para que, em seguida, suas frentes de ondas originárias interfiram-se e formem o padrão de franjas claras e escuras ao chegarem no anteparo. A linguagem verbal e gestual do licenciando reforçaram essa inclinação interpretativa, que momentaneamente pareceu inclinar-se à corrente ondulatória, mas que, em sua essência, direciona-se para a perspectiva dualista positivista.

Pesquisador: Com a fonte emitindo elétrons individuais, qual foi o teu resultado?

AB13: Não observo, é onda.

Pesquisador: E por que tu tens essa ideia, do que tu lembraste?

AB13: Foram as aulas da semana passada e retrasada, acho que levaram um pouco para essa ideia ou na verdade disseram que isso, talvez essa ideia já existia na minha cabeça só que talvez as aulas disseram, ó isso é possível.

AB13: [...] não observo, independente se eu estou atirando aí um feixe de elétrons, enfim, se comporta como uma onda, até a visão ficou mais fácil agora aqui embaixo [aponta para a Fig. 145].

A partir desse recorte, podemos identificar que a condição para a análise acerca do comportamento do objeto quântico é a existência ou não de um detector no arranjo experimental, isso quer dizer que, quando o objeto quântico não está sendo observado ao longo do experimento, o aluno o assume com caráter ondulatório.

Outro importante aspecto que se tornou evidente com o discurso apresentado é a origem da interpretação manifestada. As instruções didáticas foram citadas como fontes de conteúdo responsáveis por fundamentar as concepções articuladas na compreensão e explicação do resultado observado experimentalmente.

A postura adotada, na qual primeiramente buscou-se conhecer o resultado, para só então aferir possíveis comportamentos para o objeto quântico, é exemplificada com o seguinte excerto

Pesquisador: A tua sequência é, leitura da pergunta e identificação se tem detector ou não para então poder dar a resposta?

AB13: Isso, já no início da questão aí, por exemplo, se há um detector de não destruição, há um detector x, está observando o experimento, se observa o que está acontecendo ali, já estou vendo uma partícula.

Novamente, o licenciando reforçou a necessidade inicial de analisar por completo o arranjo experimental para só então descrever ontologicamente o objeto quântico. Epistemologicamente, o aluno AB13 inclinou-se ao viés positivista, e, pelo fato de, na presença do detector, o elétron ser imaginado como uma partícula, revelou-se a sua natureza dual. Dessa forma, consideramos que as representações mentais e os *drivers* que constituem a interpretação privada do estudante AB13 combinaram com as conjecturas da interpretação Dualista Positivista.

Por fim, o seguinte diálogo reforça o comportamento ondulatório adotado pelo estudante para os objetos quânticos nesta configuração experimental da dupla fenda.

Pesquisador: E como tu imagina o elétron saindo da fonte?

AB13: Eu vejo uma onda, eu vejo um padrão de onda ali (Fig. 146).

Pesquisador: E por que tu tens essa representação?

AB13: É porque eu não estou observando... e pelo resultado obtido.

Pesquisador: E se fosse um fóton?

AB13: Mesma coisa.

Figura 146 – Sequência de movimentos das mãos em semicírculos para representar um padrão ondulatório.



Fonte: A pesquisa.

De fato, tanto o elétron quanto o fóton foram considerados ondas circulares na compreensão e explicação do fenômeno observado. As evidências oriundas da ilustração (Fig. 145), da linguagem verbal e da linguagem gestual, foram os indicativos que revelaram essas representações mentais e esses *drivers* de caráter ondulatório mais na perspectiva dualista positivista.

Em proposições gerais, nesta configuração específica, com ausência de observador, o elétron foi assumido como onda, formando o padrão de interferência no anteparo. Neste viés, também se observou, por exemplo, a representação mental manifestada pela aluna AA4, “*eu imaginei neste caso, o elétron como sendo uma ondinha* (Fig. 147 - I)” (AA4) e pelo licenciando AB17, “*sem observador, comporta-se como uma onda [...] a onda se dividiria nas fendas e acabaria interferindo uma na outra* (Fig. 147 - II)” (AB17)

Figura 147 - (I) AA4 com a mão direita em movimento senoidal. (II) Mãos paralelas representando duas frentes de ondas interagindo após as fendas.



Fonte: A pesquisa.

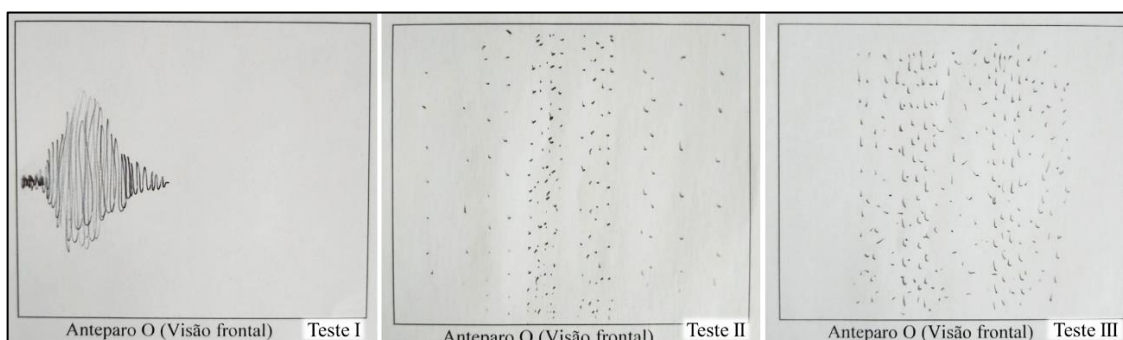
Ambos alunos verbalizaram e gesticularam o comportamento ondulatório para o elétron pelo fato de essa configuração experimental não contar com presença do observador. Essa postura adotada pelos alunos é, de fato, uma característica que tange com o entendimento conceitual da interpretação Dualista Positivista para o resultado de interferência.

Na próxima seção, continuaremos tratando dos resultados direcionados ao aparato experimental da dupla fenda com a fonte operando em regime quântico, mas agora com o acréscimo de um detector.

6.6.3 O experimento da dupla fenda: operação em regime quântico (elétrons individuais) – com a presença de um detector.

Com o acréscimo de um detector, as previsibilidades dos resultados nos testes II e III se mantiveram corretas com a indicação de um padrão de não interferência. No teste I, o aluno considerou incorretamente um resultado semelhante ao de interferência, mas com metade do padrão desenhado. A Fig. 148 compara os resultados dos anteparos nos três testes.

Figura 148 - Respostas do aluno AB13 para o a dupla fenda em regime quântico com a presença do detector.



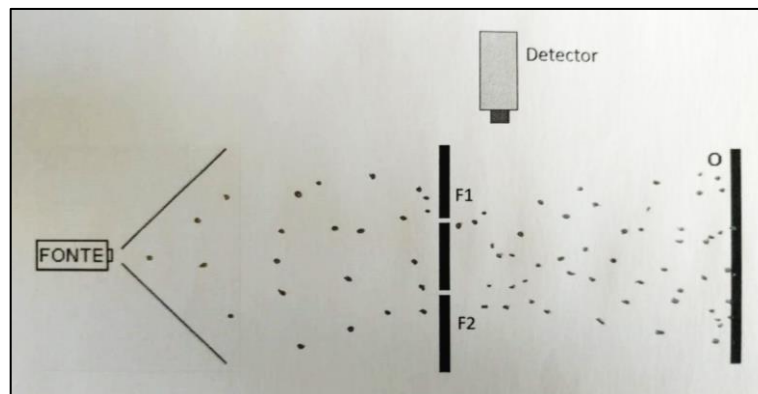
Fonte: A pesquisa.

Ao explicar o padrão adotado no teste I, inicialmente, o aluno AB13 considerou que a presença do detector impõe o bloqueio da passagem de elétrons por uma das fendas e mesmo com apenas uma abertura o padrão aconteceria, mas de maneira deslocada no anteparo. No entanto, na sequência da explicação, o licenciando se deu conta do equívoco, “*concordo sim que o padrão [de interferência] não vai ser alterado, não, mentira, o contrário, aqui deveria ser um comportamento de partícula, parecido com este aqui* [apontando para o teste II] (AB13).

Ao ser questionado sobre o motivo da alteração do resultado no teste II, o aluno mencionou a interação com as bancadas virtuais e toda carga cultural manuseada anteriormente, como livros e vídeos na internet, “*uma coisa interessante é que o simulador vai representando as ideias ali e talvez lá dentro* [apontando para a própria cabeça] *alguma coisa começa a se ligar e fazer sentido*” (AB13).

A representação dos elétrons individuais no esquema da dupla fenda (Fig. 149) o define com comportamento corpuscular. O elétron passa por uma das fendas e acaba sofrendo colisões que definem as posições que serão marcadas no anteparo.

Figura 149 - Ilustração do aluno AB13 no teste II, para representar o elétron na dupla fenda com a presença do detector.



Fonte: A pesquisa.

A influência do detector, na ocasião, não foi compreendida pelo licenciando, que repetiu uma sentença memorizada de que “*quando há observação, o padrão no anteparo se altera*” (AB13).

Pesquisador: E por que o padrão mudou?

AB13: Por que eu estou observando, tem um detector ali.

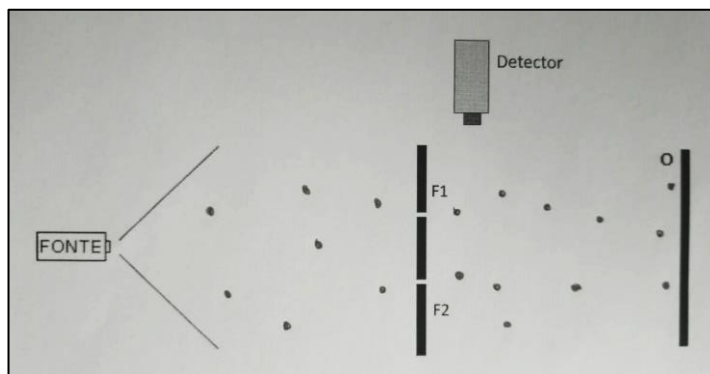
Pesquisador: Mas no que ele influencia?

AB13: Então, eu não sei dizer.

Nessa configuração experimental, a interpretação adotada para o comportamento do elétron foi próxima à interpretação utilizada para a dupla fenda com ausência de um detector, também em momento anterior às instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*. Nessa situação, o padrão no anteparo só não foi demarcado com franjas e claras devido à presença do detector, que, segundo o aluno AB13, de alguma forma influencia no resultado.

No teste III, a esquematização da trajetória do elétron (Fig. 150) efetuada pelo licenciando novamente o designou com comportamento corpuscular. Os objetos quânticos foram representados por pequenos corpúsculos que chegam em pontos aleatórios no anteparo de visualização.

Figura 150 - Ilustração do aluno AB13 no teste II, para representar o elétron na dupla fenda com a presença do detector.



Fonte: A pesquisa.

Como justificativa para a não formação da interferência, no segundo momento do *report aloud*, o aluno AB13 se expressou da seguinte forma:

Pesquisador: Se eu te peço para justificar por que não dá interferência, tu me explicarias como?

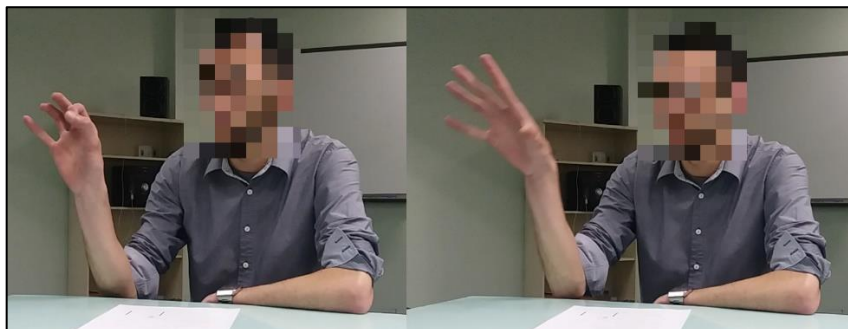
AB13: Porque eu estou observando.

Pesquisador: E tu consegues imaginar qual é a interação do detector no experimento?

AB13: Olha, ele está dando uma informação, está ligado a informação, porque em uma das aulas nós vimos que por mais que esse detector venha antes ou depois, tenha retardo ou não, algo diz... [...] comunica esse elétron aparentemente... pode ser uma explicação. Mas se eu estou observando, de alguma maneira essa partícula ela percebe essa observação, essa interação, por mais que não seja um ser racional ali observando. Parece que ela sabe que se depois alguém for acessar esse resultado ali no detector, o comportamento vai ser pré-determinado.

O acesso à informação do caminho tomado pelo elétron foi o critério adotado para a não construção do padrão de interferência. O aluno mostrou acreditar em alguma possível espécie de comunicação entre o detector e o objeto quântico, fazendo com que o mesmo saia da fonte como corpúsculo. Ainda que não especifique possíveis ações de realizar uma medida, a postura dualista positivista destacou-se na sua interpretação privada. Sendo assim, o elétron, ao sair da fonte, já foi imaginado como um corpúsculo e desta forma não forma interferência alguma, “*ele sai da fonte como uma partícula lançada* (Fig. 151), *eu não consigo associar aquela ideia em que a partícula tem um padrão de onda associada, pra mim não tem muito sentido*” (AB13).

Figura 151 - Sinalização de uma pequena esfera sendo disparada.



Fonte: A pesquisa.

Vemos o elétron sinalizado como uma pequena esfera sendo arremessada frontalmente. Logo, os gestos realizados reforçam a evidência da sua representação mental na qual o objeto quântico, com a presença do detector é interpretado com comportamento corpuscular. Ademais, o aluno, em seu discurso verbal, descartou a possibilidade de uma onda associada, afastando-se assim de pressupostos da interpretação dualista realista.

Em relação às mediações responsáveis por auxiliarem e fundamentarem conceitualmente as representações mentais e *drivers* empregados na compreensão dessa configuração experimental, o aluno AB13 afirmou ter lembrado “*das aulas e das simulações*” (AB13). Assim, as bancadas virtuais e os *storyboards* contribuíram para modificações e reforços das concepções já existentes na estrutura cognitiva do estudante devido a uma carga cultural inicial, o que favorece, desta forma, o licenciando no estabelecimento de uma interpretação privada com essência dualista positivista.

Em face a essa interpretação para a configuração experimental em questão, a aluna AA4, por exemplo, ao ser questionada sobre o comportamento do elétron, reportou “*pra mim, agora, o elétron é uma partícula que saiu da fonte, e como tem o detector, ou ele passa por uma fenda ou por outra, não tem como ele passar pelas duas*” (AA4). Esse excerto, extraído do segundo momento do *report aloud*, chama a atenção para a transição das representações mentais e *drivers* relacionados à ontologia do objeto quântico. Devido à previsão de não formação do padrão de interferência, o objeto quântico passa a ser assumido como um corpúsculo. Contudo, a influência do detector no arranjo experimental não foi explicada pela licencianda, que alegou não ter certeza de como o elemento “*medição*” afeta o resultado no anteparo.

Levando em consideração as possíveis alternâncias de representações mentais para o elétron, de acordo com o resultado do experimento, podemos mencionar o caso da aluna AB14, que permaneceu em dúvidas quanto ao seu comportamento, pois na questão sem observador, ela se mostrou convicta de que o objeto quântico, de fato, podia ser interpretado como uma

onda, contudo ela expôs seu conflito da seguinte forma “*o que eu penso é que realmente, não faz sentido o padrão de interferência sumir se aquilo (elétron) é uma onda*” (AB14), em seguida, questionada sobre qual seria a forma mais adequada para pensar o elétron, ela respondeu: “*depende o caso... [e que] para este caso não cabe a questão da onda*” (AB14). Diante disso, podemos identificar explicitamente a mudança e adaptação das representações e *drivers* da licencianda AB14 para compreender e justificar sua resposta.

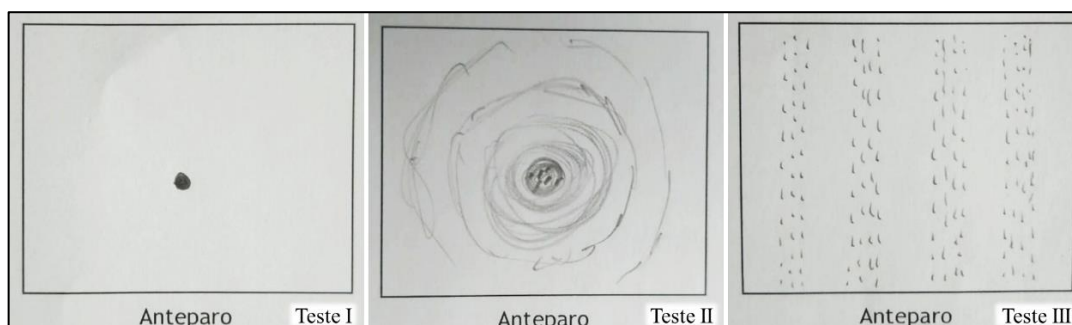
De maneira geral, na presença do detector, os alunos sinalizaram a compreensão do elétron com um comportamento corpuscular devido à análise *a priori* do resultado apresentado pelo experimento, no qual o padrão de interferência não era formado. Logo, o elétron foi considerado um corpúsculo ao longo do *setup* experimental, em suma, nesta conduta epistemológica aguarda-se o desfecho do experimento para só então aferir conjecturas acerca da ontologia do objeto quântico. Neste segmento, cabe ressaltar que a influência do detector no arranjo experimental permanece sendo uma dúvida recorrente entre os licenciandos.

Concluída a análise acerca do arranjo experimental da dupla fenda, nas próximas seções, trataremos dos resultados direcionados ao IMZ nas suas diferentes possibilidades de composição experimental.

6.6.4 O experimento do IMZ: operação em regime clássico – laser.

A primeira configuração experimental do IMZ é aquela em que a fonte permanece regulada para emitir um laser, para este cenário a previsibilidade do resultado de interferência aconteceu para os testes II e III, no teste I, a resposta indicada no anteparo foi de um sinal esférico central. A Fig. 152 exibe os resultados traçados pelo aluno AB13.

Figura 152 - Respostas do aluno AB13 para o IMZ em regime clássico (laser).



Fonte: A pesquisa.

Olhando para as figuras de interferência, percebemos que elas se diferem, a do teste II em formas singulares é parecida com a projetada pela bancada virtual, já a do teste III na forma

de franjas verticais, é semelhante a apresentada nos *storyboards*. Aqui, já temos um pequeno indício de que ao resolver o teste III, o licenciando recorda as representações direcionadas a dupla fenda, para resolver o problema proposto sobre o IMZ.

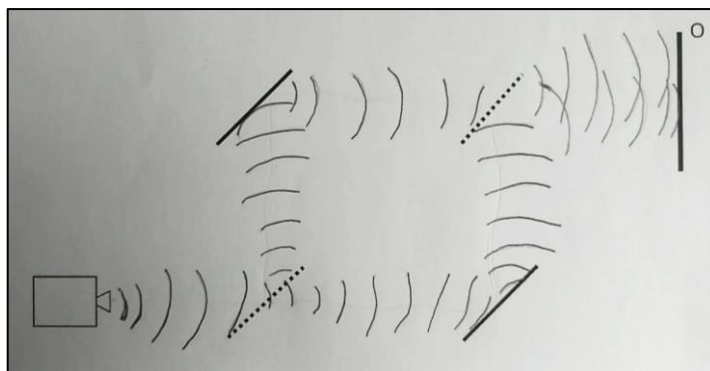
Em relação às justificativas apresentadas para as escolhas das respostas dos dois primeiros testes, duas versões distintas foram apresentadas. Quando retratou um ponto central no anteparo, o estudante acreditou na divisão de um laser pontual, que ao chegar no segundo espelho semirrefletor se une novamente e retorna ao mesmo padrão inicial de quando saiu da fonte. Essa explicação foi descrita no teste e também manifestada no primeiro momento do *report aloud*.

O segundo argumento, empregado para explicar o padrão de interferência do teste II, manteve a visão ondulatória para o feixe de luz, mas agora, devido à diferença de fase, as duas porções divididas do laser se superpõem após o segundo espelho semirrefletor e formam as interferências construtivas e destrutivas. De acordo com o aluno, essa resposta de interferência e a construção da argumentação partiram da interação com o simulador:

[...] pelo simulador, ele foi bem influente, ele vinha trazendo já uma ideia, já formulando toda uma ideia, estava na cara, pelo menos o que eu entendi que ele queria demonstrar que o comportamento está mais para onda do que partícula (AB13).

Após as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards*, a interpretação ondulatória adotada para o comportamento do feixe de luz se manteve. A sua representação no *seutp* experimental (Fig. 153) expressou ondas semicirculares que se dividem e posteriormente se unem causando o padrão de interferência.

Figura 153 - Ilustração do aluno AB13 no teste III, para representar o feixe de luz no IMZ.



Fonte: A pesquisa.

No segundo momento do *report aloud*, as representações mentais e *drivers* ondulatórios foram evidenciados,

[...] feixe de luz, não estou observando, interferência. Comportamento ondulatório... você tem o feixe, o padrão ondulatório aqui, esse espelho refrata e vai aproximadamente 50% por aqui [um dos caminhos do IMZ] e 50% por aqui [outro caminho do IMZ] e quando eles se unem tem o padrão de interferência, aí esse padrão de interferência é parecido com o da dupla fenda né, interferência construtiva e destrutiva (AB13).

Desta forma, revelou-se explicitamente a interpretação adotada na compreensão dessa configuração experimental do IMZ. Além disso, a menção a dupla fenda na explicação do IMZ remeteu a possível modelização do resultado a partir de um experimento considerado análogo. Nesse sentido, ao ser questionado sobre os fatores que o conduziram a pensar desta forma no momento da resolução do teste III, o aluno respondeu:

[...] eu imaginei bem parecido a ideia da gota que cai numa piscina (Fig. 154 – I), o padrão ondulatório que se forma, aqui [apontando para o primeiro espelho semi refletor] seria grosseiramente falando, uma dupla fenda, né. Esse espelho ele tem o mesmo comportamento da dupla fenda, eu não sei te explicar bem. Mas aí chegou nesse espelho [semi refletor], serão duas fontes de onda (Fig. 154 – II), aqui [espelho] só reflete a onda, e nesse momento aqui [segundo espelho semi refletor], como você tem mais uma dupla fenda, grosseiramente falando, há o comportamento de interferência no anteparo (AB13).

Figura 154 – (I) Dedo indicador levantado para sinalizar a queda de uma gota de água. (II) Sequência de gestos para representar duas frentes de ondas.



Fonte: A pesquisa.

Tendo em vista a linguagem verbal e gestual manifestada, podemos identificar um modo de modelização científica construída com a aplicação de conceitos relacionados a um experimento análogo, o da dupla fenda. O aluno assimila as representações e as proposições teóricas pertinentes à dupla fenda, e, a partir da compreensão do comportamento do laser naquela situação, entende que a mesma ideia pode ser transladada a esta situação experimental do IMZ. Portanto, os *storyboards* não só auxiliaram na compreensão dos fenômenos na dupla fenda, como também possibilitaram subsídios teóricos para a análise de um experimento com arranjo estrutural diferente, mas conceitualmente análogo.

A modelização a partir dos *storyboards* também foi observada na explicação da aluna AB14, quando por exemplo, mencionou “*é a questão de uma onda... interferindo uma com a outra, que nem na dupla fenda, só que nesse caso no interferômetro*” (AB14). Citando o experimento da dupla fenda, a licencianda reforçou as semelhanças da interpretação adotada para as mesmas configurações dos dois experimentos. O resultado de interferência, previsto “*não tem detector, nem nada, então vai causar interferência*” (AB14), também foi explicado em termos ondulatórios, com a divisão dos feixes nos espelhos semirrefletores e suas superposições ao chegarem no anteparo.

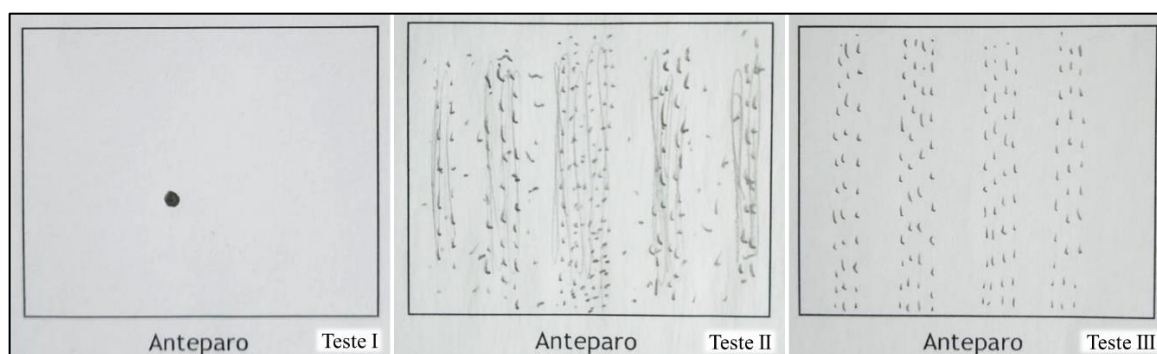
De forma semelhante, a aluna AA4, ao justificar o padrão de interferência indicado no teste III, devido à lembrança da interação com a bancada virtual, utilizou atributos ondulatórios para o feixe de luz, “*o feixe de luz é uma onda... uma parte da onda vai refletir e a outra vai refratar e depois vai ter aqui [apontando para segundo espelho semirrefletor] a interferência*” (AA4). Como esperado, uma vez que o resultado de interferência foi confirmado no anteparo, sendo o arranjo experimental em regime clássico ou quântico, os alunos inclinados à interpretação dualista positivista tendem a empregar representações mentais e *drivers* ondulatórios em sua resolução.

Na sequência, apresentaremos a análise sobre os resultados direcionados ao IMZ em regime quântico.

6.6.5 O experimento do IMZ: operação em regime quântico – fótons individuais.

Para o regime quântico do IMZ, as previsibilidades dos resultados novamente foram corretas nos testes II e III com a indicação do padrão de interferência no anteparo. Para o teste I, o resultado incorreto de um único ponto esférico também se repetiu. Em síntese, a Fig. 155 apresenta as imagens construídas pelo licenciando no momento da resolução dos testes.

Figura 155 - Respostas do aluno AB13 para o IMZ operando em regime quântico.

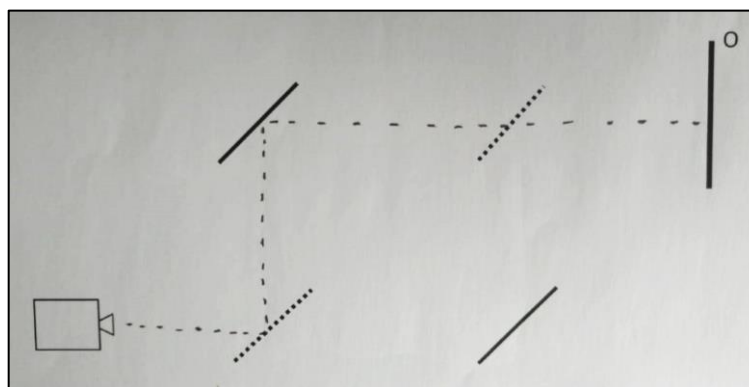


Fonte: A pesquisa.

Questionado sobre o padrão esférico central no anteparo do teste I, o aluno AB13 o descreveu como sendo o resultado de um comportamento corpuscular do fóton no IMZ, no próprio teste, a justificativa foi dissertada da seguinte forma: “o fóton escolheria um caminho a qual percorrer, indo ao encontro do anteparo” (AB13). Assim, o objeto quântico na forma de uma partícula ou reflete ou atravessa os espelhos semirrefletores até chegar no mesmo ponto do anteparo.

No teste II, o padrão de interferência foi adotado como resposta, mas a representação corpuscular para o fóton permaneceu. Na ilustração que esquematiza o seu caminho no *setup* experimental (Fig. 156), o fóton foi determinado como uma partícula bem definida que trafega por apenas um dos caminhos possíveis do IMZ, ou seja, ou reflete ou refrata pelos espelhos semirrefletores.

Figura 156 - Ilustração do aluno AB13 no teste II, para representar o fóton no IMZ.



Fonte: A pesquisa.

Esta concepção corpuscular, até o momento, também foi reforçada com a linguagem verbal expressada no primeiro momento do *report aloud*. Vejamos o seguinte excerto.

AB13: O fóton sai da fonte, ele chega no espelho semi refletor, digamos que aqui tivesse 50,3% desse caminho [apontando para um dos caminhos do IMZ], e encontra o anteparo.

Pesquisador: E por que tu achas que surge esse padrão de interferência?

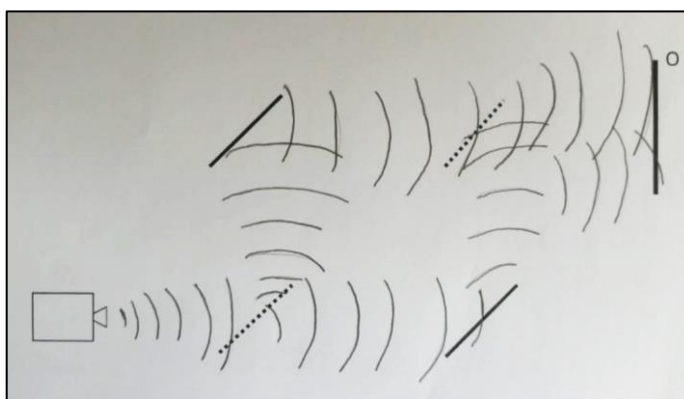
AB13: Volto a dizer, depois do simulador, ainda não consigo desvincular a ideia de ser partícula, só que o padrão formado está muito mais para ser onda.

Diante dessas considerações, podemos identificar que a bancada virtual contribuiu para a memorização do resultado de interferência, do qual o licenciando tem consciência de ser um fenômeno característico de onda. Entretanto, não consegue desvincular suas representações mentais e *drivers* de natureza corpuscular, mesmo sentindo dificuldades em justificar a construção da interferência, uma vez que não apresenta subsídios teóricos que deem conta de explicar as franjas claras e escuras na perspectiva da interpretação corpuscular.

Por esses motivos, antes das instruções didáticas com os *storyboards*, o aluno AB13 relevou representações mentais e *drivers* de cunho corpuscular para o comportamento do fóton no IMZ e, talvez por isso, não conseguiu compreender claramente as causas para a origem do padrão de interferência. Mesmo assim, manteve a resistência sobre uma possível alteração destas representações mentais e *drivers* para uma tendência ondulatória, por exemplo.

Passada as interações com os *storyboards*, na resolução do teste III, o licenciando alterou suas representações mentais e *drivers* para justificar o padrão de interferência. Na Fig. 157, observamos que o fóton, agora, é ilustrado com características ondulatórias, isto é, o fóton é aparentemente uma onda semicircular que se divide ao chegar no primeiro espelho semirrefletor.

Figura 157 - Ilustração do aluno AB13 no teste III, para representar o fóton no IMZ.



Fonte: A pesquisa.

De acordo com o segundo momento do *report aloud*, temos a seguinte explicação:

AB13: Continuo não observando o experimento, então o padrão encontrado vai ser o de interferência, aqui o fóton é mais fácil de associá-lo a uma onda do que o elétron, na minha cabeça.

Pesquisador: Por que acontece o padrão de interferência?

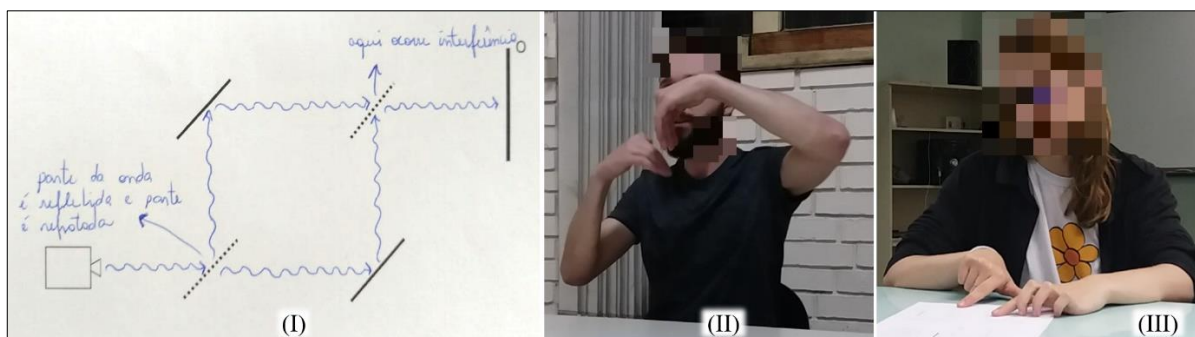
AB13: [...] se for parar para pensar, esse espelho aqui [semi refletor], é uma dupla fenda, é um fóton, é uma onda, não estou observando, essa onda vai se dividir, vai se comportar como o feixe, quando se encontrar novamente aqui vai haver um padrão de interferência né, construtivo e destrutivo e forma isso que eu visualizo no anteparo.

Novamente, podemos observar representações mentais e *drivers* da interpretação privada do aluno AB13 que se identificam com a corrente dualista positivista. A presença ou não de um detector e, conseqüentemente, a previsibilidade do resultado a ser formado no anteparo foram determinantes na imaginação e definição do comportamento do objeto quântico. Logo, nesta situação, para explicar o padrão de interferência, já conhecido, o fóton é descrito em termos ondulatórios.

No tocante as mediações que influenciaram a construção dessa explicação, o licenciando fez a seguinte afirmação “*é o que eu venho acreditando, é o que eu absorvi, o que faz sentido para mim das simulações e das aulas*” (AB13). A contribuição das bancadas virtuais e dos *storyboards* foi reconhecida pelo estudante, que ao solucionar o problema do IMZ também emprega os conceitos oriundos da perspectiva dos arranjos experimentais da dupla. Desta forma, podemos caracterizar como forma de modelização científica a descrição do comportamento do objeto quântico no IMZ, a partir da interpretação privada construída com o apoio teórico das bancadas virtuais e dos *storyboards*.

Para esse desfecho experimental, os licenciandos AB14, AB17 e AA4 também manifestaram suas inclinações dualistas positivistas ao preverem o resultado de interferência no anteparo, devido à consciência da ausência de um detector. Deste modo, o objeto quântico novamente foi representado com comportamento ondulatório ao longo do IMZ, “*se o resultado é esse [de interferência], então o fóton está saindo uma ondinha da fonte* (Fig. 158 – I)” (AA4), “*vem uma frente de onda e ela acaba sendo dividida aqui [primeiro espelho semirrefletor] e juntada aqui de novo [segundo espelho semirrefletor], e a frente de onda que está vindo de baixo, junta com a vinda de cima e uma acaba interferindo com a outra* (Fig. 158 – II)” (AB17), e nas palavras da aluna AB14 “*eu sabia a resposta que tinha que dar ... por causa do simulador*” (AB14), assim, o comportamento do objeto quântico foi descrito de forma semelhante à forma dos seus colegas, “*sai da fonte como uma onda... aí ele [fóton] se divide* (Fig. 158 – III), *bate nos espelhos e reflete, bate aqui [segundo espelho semirrefletor], uma parte vai ser refletida e a outra segue o caminho e daí vai acabar acontecendo a interferência*” (AB14).

Figura 158 – (I) Ilustração da aluna AA4 no teste III, para representar o fóton no IMZ. (II) Aluno AB17 sinalizando a interferência das frentes de ondas. (III) Aluna AB14 indicando a divisão do fóton no primeiro espelho semirrefletor.



Fonte: A pesquisa.

As representações mentais e *drivers* exemplificados nestes excertos proviram fundamentalmente das interações com as bancadas virtuais e sobretudo com os *storyboards*. O caráter adotado para o objeto quântico é dependente do resultado previsto, isto quer dizer, o

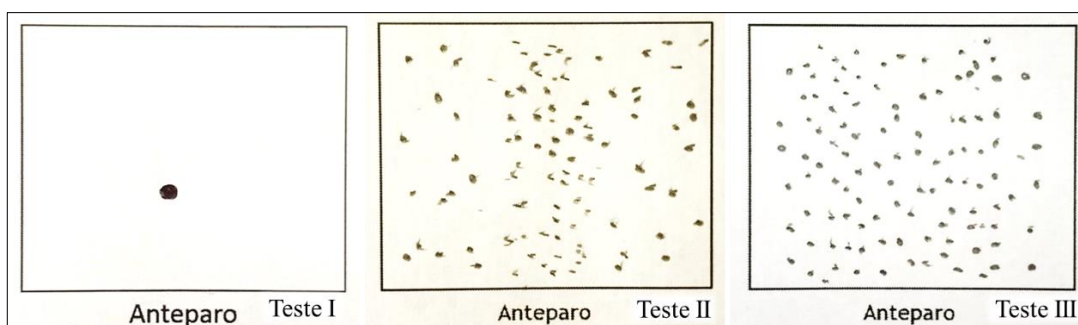
resultado de interferência deriva da bancada virtual e a sua justificativa é fundamentada por meio das conjecturas presentes nos *storyboards*.

Caminhando para o término da análise individual dos arranjos experimentais, na próxima seção abordar-se-á a terceira e última configuração do IMZ, quando a fonte opera em regime quântico com a presença de um detector.

6.6.6 O experimento do IMZ: operação em regime quântico (fótons individuais) – com a presença de um detector.

Para essa configuração experimental, na qual um detector é acrescentado e a fonte permanece emitindo fótons individuais, as previsibilidades dos resultados foram corretas, com a sinalização de um padrão de não interferência nos anteparos dos testes II e III. No teste I não houve a previsão de interferência, mas a figura desenhada como resposta é de uma única esfera centralizada na região do anteparo. A comparação dos três resultados é vista na Fig. 159.

Figura 159 - Respostas do aluno AB13 para o IMZ operando em regime quântico com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

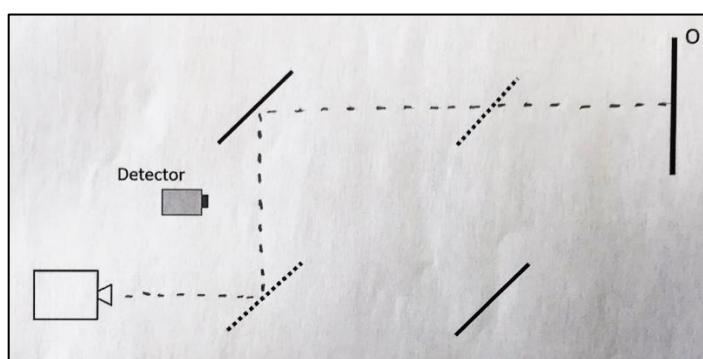
Justificando o resultado do teste I, o aluno AB13 adotou a natureza corpuscular para o fóton e apontou o detector como um simples instrumento, que realizará a medida apenas dos objetos quânticos que passarem pelo seu caminho. O motivo para a desconstrução do padrão de interferência não foi claro na concepção do estudante, e o conhecimento da resposta foi oriundo de algumas leituras que apontam a presença do detector como um fator responsável por alterar o comportamento do objeto quântico.

O conhecimento acerca da resposta do teste II foi confirmado, segundo o aluno, pela interação com a bancada virtual. Já a influência do detector ganhou uma explicação até então não mencionada no primeiro momento do *report aloud* “*pra eu olhar, eu adicionei alguma coisa ali, entendeu, tem que ter um fóton retornando pra minha retina, pros meus olhos pra eu enxergar, então eu já alterei esse sistema*” (AB13), desta forma, o licenciando apresentou uma

breve ideia acerca da interação do detector, a alteração das características iniciais do sistema provocada pela emissão de fótons na tentativa de alguma observação. Porém, o aluno não conseguiu descrever de que forma essa interação modifica as posições dos fótons.

Neste momento que antecedeu as instruções didáticas, o fóton foi assumido com natureza corpuscular, da mesma forma que foi descrito na configuração do IMZ sem detector. No teste II, por exemplo, a ilustração do fóton no IMZ (Fig. 160) segue características corpusculares, com formato esférico bem definido e sem a indicação de divisão nos espelhos semirrefletores.

Figura 160 - Ilustração do aluno AB13 no teste II, para representar o fóton no IMZ com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

Essa interpretação corpuscular foi manifestada na linguagem verbal e gestual presente no primeiro momento do *report aloud*. O recorte, a seguir, exemplifica algumas representações mentais e *drivers* de caráter corpuscular empregados na explicação do experimento.

AB13: A fonte lançou, e nesse caso tinha 50,5% dele [fóton], vir para o lado de cá da esquerda (Fig. 161 – I), passa pelo espelho e se choca com o anteparo. Uma segunda opção, lança o próximo fóton, só que ele não está totalmente alinhado com o primeiro, houve uma pequena vibração ali, um pequeno ricocheteio, alguma coisa assim, daí agora teve, por exemplo, 50,3% de chances de passar pelo lado da direita, ele passa por aqui [apontando para um dos “braços” do IMZ], só que ele não está exatamente no mesmo caminho, então o local que ele vai se chocar no anteparo (Fig. 161 – II) é diferente.

Figura 161 – (I) Sinalização de um caminho do IMZ seguido pelo fóton. (II) Representação de uma colisão do fóton com o anteparo.

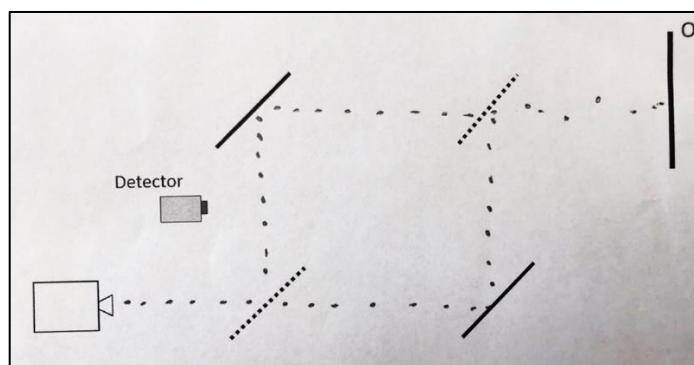


Fonte: A pesquisa.

Desta forma, evidenciou-se a natureza corpuscular adota para o fóton ao longo do *setup* experimental, o mesmo foi encarado na forma de corpúsculo indivisível, que a partir de probabilidades, segue apenas um dos caminhos, até colidir com o anteparo em pontos aleatórios. Como já mencionado, a interação do detector ainda não estava precisa na compreensão do IMZ nessas condições.

No teste III, a ilustração para o fóton ao longo do interferômetro manteve a adoção de características corpusculares, como podemos ver na Fig. 162.

Figura 162 - Ilustração do aluno AB13 no teste III, para representar o fóton no IMZ com a presença de um detector.



Fonte: A pesquisa.

Descrevendo ontologicamente o fóton com natureza corpuscular, a aceção da interpretação dualista positivista surgiu, quando em sua explicação, o aluno AB13 mencionou “*agora eu estou observando, corpúsculo, pode ser um fóton, pode ser um elétron, é uma partícula assim* (Fig. 163)” (AB13). Essa ideia expressa a alteração das representações mentais e *drivers* que anteriormente, sem o detector, assumiam o objeto quântico com comportamento ondulatório e agora, com o detector, o descrevem com natureza corpuscular.

Figura 163 – Representação de uma esfera para descrever o fóton.



Fonte: A pesquisa.

Seguindo com a explicação do experimento, no segundo momento do *report aloud*, o aluno AB13 compreendeu a evolução do fóton no IMZ da seguinte forma:

AB13: A partícula nesse caso, segue este caminho ou este caminho [apontando para o IMZ], e os espelhos (semirrefletores), as duplas fendas digamos assim, são só aparatos para orientar se ele vai passar ou não vai passar.

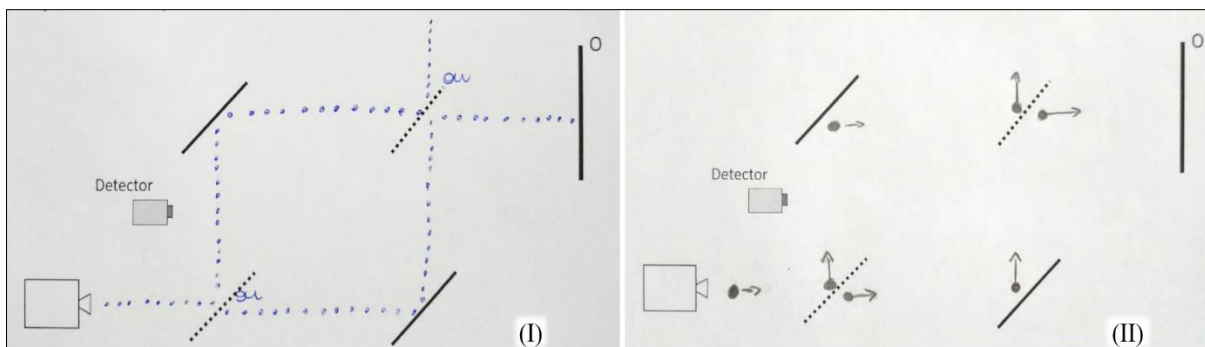
A partir deste excerto, ficou evidente a postura corpuscular adotada na correspondência do fóton, sobretudo na afirmação da sua passagem por um caminho ou por outro. Também é possível identificar novamente a comparação da dupla fenda com o espelho semirrefletor, considerados análogos.

Por um ângulo semelhante, as alunas AA4 e AB14 também modificaram suas representações mentais e *drivers* para um caráter essencialmente corpuscular ao perceberem o acréscimo de um detector no arranjo experimental e a conseqüente desconstrução do padrão de interferência. Assim, na concepção da licencianda AA4, por exemplo, o objeto quântico “*é partícula e forma uns pontinhos* (Fig. 164 – I), *sem padrão*” (AA4), e complementa seu raciocínio, afirmando que “*como tem o detector, o detector ou vai detectar ou não vai detectar o fóton, então, ou ele passou aqui* [apontando para um dos caminhos do IMZ] *ou ele não passou, daí ele passou aqui*” (AA4). A descrição da indivisibilidade do objeto quântico e a própria menção a partícula na definição de sua ontologia indicam pressupostos corpusculares, e portanto, expressam a inclinação dualista positivista (considerando todo o contexto precedente).

Para a licencianda AB14, a variação de suas representações mentais e *drivers* ao adotar caráter corpuscular para o objeto quântico (Fig. 164 – II), resultou da previsibilidade do resultado, “*eu não consigo imaginar uma onda não criando um padrão de interferência*” (AB14). Logo, a memorização do resultado de não interferência conduziu a aluna a modificar sua compreensão para o comportamento do objeto quântico. Contudo, as licenciandas AA4 e

AB14, a exemplo do que aconteceu nas explicações da dupla fenda, não elucidaram possíveis influências do detector no arranjo experimental. Seguindo a atitude positivista justificam as alterações das representações mentais e *drivers* por meio da previsibilidade do resultado, atribuindo uma espécie de relação causal entre o padrão no anteparo e a ontologia do objeto quântico.

Figura 164 - (I) Ilustração da aluna AA4 e (II) Ilustração do aluno AB14 no teste III, para representar o fóton no IMZ com a presença do detector.



Fonte: A pesquisa.

Para esse arranjo experimental, diferentemente da concepção manifestada na dupla fenda com detector, o aluno AB17 imaginou o fóton com comportamento ondulatório. A partir dessa perspectiva, justificou a não formação das franjas de interferência em consequência da ação do detector, que de alguma forma bloqueia a metade da onda formadora do fóton que seguiu pelo caminho do detector. Ainda que tenha apresentado uma propensão a interpretação dualista positivista nas demais situações experimentais, o aluno AB17 evidenciou o seu hiato interpretativo diante dessa situação problema, na qual não assimilou e migrou conjecturas dualistas positivistas para justificar o resultado previsto. Justificando-o, em contrapartida, a partir das concepções de cunho ondulatório.

Continuando com o movimento da análise, ao direcionarmos nossa atenção para a influência do detector no arranjo experimental, o licenciando representativo AB13 comentou:

AB13: É a questão da informação, se eu tenho a informação, não necessariamente, eu AB13 tenho que estar vendo. O detector registrou, se eu acessar esta informação na verdade, o detector registrou, mas se ninguém viu, se eu visualizo eu fiz uma medida, entendeu? Aí muda o padrão [...] se eu observo, pode ter retardo, não retardo, se em algum momento eu tenho acesso a essa informação, se eu consigo visualizar de certa forma o caminho, digamos assim, é corpúsculo.

A exemplo da explicação empregada para a dupla fenda, o fator da informação acerca do caminho tomado pelo fóton desconstruiu o padrão de interferência. A interação detector e objeto quântico não foi elucidada, ou seja, a possível comunicação não foi detalhada pelo

licenciando. Dito isto, novamente podemos identificar traços de modelização científica na construção da interpretação privada de caráter dualista positivista para o comportamento do objeto quântico no *setup* experimental do IMZ, com a presença de um detector.

Por fim, podemos assinalar que as instruções didáticas mediadas pelos *storyboards* auxiliaram nesta compreensão, visto que, segundo o licenciando foi a lembrança “*das aulas, não a explicação em si, mas o fundamento da explicação*” (AB13) que o conduziram a se estabelecer nesta interpretação.

Na próxima seção, serão engendradas considerações acerca das potencialidades desta investigação diante do seu embasamento teórico-metodológico, retomando o levantamento das evidências necessárias para o alcance das respostas às perguntas norteadoras do estudo. Além do mais, buscaremos traçar um paralelo entre os nossos resultados e os de estudos anteriores, pretendendo estabelecer um grau de generalização e progresso das asserções de valor e conhecimento construídas.

6.7 O QUE OS RESULTADOS NOS DIZEM?

Tendo em vista o universo dos resultados descritos, nesta investigação, identificamos as representações mentais e os *drivers* dos licenciandos em física ao descreverem suas compreensões conceituais acerca do comportamento dos objetos quânticos nas diferentes configurações experimentais da dupla fenda e do IMZ. A partir das articulações dessas representações mentais e *drivers*, foi possível analisar as interpretações privadas dos estudantes e compará-las com as principais correntes interpretativas da MQ. Sobretudo, buscamos estabelecer as influências dos mecanismos externos de mediação utilizados ao longo deste estudo nas possíveis construções e alterações dessas concepções relacionadas fundamentalmente ao fenômeno da dualidade onda-partícula.

A análise dos dados qualitativos revelou que a maioria dos estudantes sinalizou uma postura epistemológica realista ao descrever o sistema físico quântico do experimento da dupla fenda e do IMZ, e, como já mencionado, a ontologia empregada na análise do comportamento do elétron e do fóton, na maioria dos casos, antecedeu a realização do experimento e a observação do resultado final.

As bancadas virtuais foram mais eficientes no auxílio das previsões dos resultados a serem formados no anteparo. Quase que a totalidade dos estudantes mencionou os *softwares* no momento de relatar a lembrança principal que os fizeram optar por tal resultado nos testes. Já os *storyboards* contribuíram para a construção das interpretações privadas que buscam explicar

como o objeto quântico comportou-se ao longo dos *setups* experimentais, sobretudo os que operavam em regime quântico. Grande parte dos alunos compreende a possibilidade do comportamento dual, corpuscular ou ondulatório do elétron, mas o descreve geralmente em termos clássicos, ignorando considerações consistentes determinadas pela teoria quântica, como a interpretação do estado quântico e até mesmo a questão da influência da realização de uma medida/observação, fatores estes que não fazem sentido se explicados classicamente.

As representações mentais empregadas principalmente nas explicações para a dupla fenda e IMZ em regime quântico com a presença de um observador, na sua maioria, são heranças das concepções clássicas e deterministas. Os alunos se estabelecem em uma interpretação para explicar os resultados, mas, ao externalizarem as suas concepções para essa forma de arranjo experimental, e ao citarem termos fundamentais como “partícula”, “onda”, “momentum” e “interferência” no contexto quântico, ainda os utilizam como se estivessem tratando de fenômenos clássicos. Neste cenário, após a instrução formal com as bancadas virtuais e os *storyboards*, as representações mentais são mistas, isto é, estabelecem relações entre as identidades clássicas e quânticas ao tratar um sistema quântico para o comportamento do objeto quântico.

Nesta direção, o estudo realizado por Kizilcik e Yavas (2016) também indica as dificuldades de professores de física com a transição da FC para a FQ evidenciando-as em tópicos fundamentais da MQ, como a radiação do corpo negro, dualidade onda-partícula e princípio da incerteza. No entanto, o estudo mostrou que os professores não tiveram dificuldades no que concerne ao cálculo matemático. Em outro estudo, Körhasan e Miller (2019) descobriram que dois terços de estudantes de MQ tinha dificuldade em discriminar entre ideias clássicas e quânticas, e mantinham modelos mentais que eram inconsistentes e específicos em problemas tradicionais, como os direcionados ao fenômeno da dualidade onda-partícula.

Como os *storyboards* só apresentavam ilustrações conceituais representativas para o experimento de dupla fenda, esperávamos que os licenciandos as utilizassem como referência na construção da compreensão dos resultados exibidos no IMZ, e realizassem, portanto, uma modelização científica espontânea. De fato, a maioria dos acadêmicos trasladou os princípios das interpretações, direcionados da dupla fenda ao IMZ. As situações em que os *storyboards* foram mencionados com mais frequência como mecanismo externo de mediação responsável pelo auxílio na elaboração da resposta foram nos regimes quânticos da dupla fenda e do IMZ, ambos sem a presença de um detector/observador.

Neste cenário, observamos um avanço proporcionado pelo nosso estudo, tendo em vista que em seu trabalho, Maries et al. (2017) partem justamente de resultados de pesquisas que mostram que alunos de cursos introdutórios de MQ normalmente têm dificuldades em usar um conceito em contextos diferentes dos quais eles aprenderam. No entanto, em nossa investigação, as representações mentais e *drivers* construídos sob o plano de fundo do experimento da dupla fenda puderam ser empregados no IMZ, pelos licenciandos, com um rigor teórico condizente.

Nossos resultados também se relacionam com os obtidos por Montenegro e Pessoa Jr (2002), que analisaram as concepções de 121 estudantes de graduação e pós-graduação em Física, acerca de tópicos fundamentais da MQ, com o objetivo de investigar as interpretações privadas que os alunos desenvolvem a respeito dessa teoria. O estudo identificou que em diversos casos, principalmente no que tange ao estudo do arranjo experimental da Dupla Fenda, ocorreram contradições nas interpretações (ora corpuscular ora ondulatório, por exemplo) dos acadêmicos, indicando que “um estudante muitas vezes utiliza diferentes scripts (miniteorias) ou imagens ao tratar de diferentes aspectos de problemas novos e difíceis” (MONTENEGRO; PESSOA JR, 2002, p. 7). Outro resultado importante e que converge para nossos objetivos de pesquisa, é a constatação da necessidade de os alunos “imaginarem” o mundo físico em nível quântico, os elétrons são vistos como “bolinhas”, embora possam estar “dissolvidos na eletrosfera”. Os autores ressaltam que essas visões podem ser coerentes com posturas realistas e que são contrárias à interpretação oficial ortodoxa, conhecida como positivista, que em geral também é aceita pelos alunos.

Em um estudo realizado nos Estados Unidos, Baily e Finkelstein (2010) analisaram variações nas estratégias de ensino adotadas por professores a respeito da interpretação da MQ em dois cursos similares de Física Moderna, e examinaram os impactos dessas metodologias nas concepções dos alunos acerca da TQ. Os autores foram motivados pelos resultados do estudo realizado por Wuttiptom et al. (2009), no qual os estudantes mostraram mais dificuldades e erros em questões direcionadas a interpretações dos fenômenos, como por exemplo, itens que tratavam da interpretação de Copenhagen e da natureza da luz e/ou elétron em determinados arranjos experimentais.

Os resultados apontaram que a maioria dos estudantes, ao preferirem a visão realista para o experimento da dupla fenda, mantêm a mesma interpretação do problema da posição do elétron no átomo. No entanto, em torno de metade dos entrevistados preferem a descrição do elétron como pacotes de ondas no experimento da dupla fenda e, ainda assim, acreditam na posição definida do elétron no átomo. A investigação sinalizou, também, a maior probabilidade para o desenvolvimento das percepções realistas dos estudantes quando o professor abordava

as ontologias dos alunos de forma mais sucinta. Os autores concluem indicando uma linha de resultados que apontam as capacidades dos alunos nas aplicações de ferramentas matemáticas, mas sem sucesso semelhante para a compreensão conceitual correspondente.

Em relação à utilização de tutoriais interativos para o ensino da MQ, a investigação realizada por Maries, Sayer e Singh (2017) obteve resultados positivos ao encontrar evidências de aprendizagem de conceitos da MQ de graduandos e pós-graduandos em física após desenvolverem atividades baseadas em tutoriais interativos direcionados ao IMZ e ao experimento da dupla fenda. Pontos positivos semelhantes foram observados em nosso estudo, tendo em vista a influência em diversos aspectos dos guias para a utilização dos simuladores baseados no P.O.E. e também os *storyboards* com representações específicas na construção das interpretações empregadas pelos licenciandos em física durante a resolução dos problemas propostos nos testes aplicados.

Nossas descobertas indicam a pluralidade interpretativa praticada pelos alunos ao definirem suas concepções acerca do comportamento das entidades quânticas, embora tenhamos também reforçado os resultados de estudos anteriores ao observarmos que a essência determinista clássica ainda estabeleça certa influência no modo como os futuros professores de física pensam a MQ.

Conjuntamente, constatamos que a carga conceitual, construída pelo estudante no período que antecedeu as atividades deste estudo opera consideravelmente como mecanismo externo de mediação responsável pela construção interpretativa acerca da natureza do objeto quântico. Muitas dessas contribuições podem tornar-se positivas na asserção de conceitos quando desenvolvidas com significativo rigor teórico. Contudo, outras podem tornar-se obstáculos epistemológicos significativos quando, ainda que involuntariamente, negligencie aspectos conceituais interpretativos.

A partir do cenário apresentado, no qual buscamos nos referir a um marco estabelecido na pesquisa em ensino de Física para traçar exemplos de comparação de resultados em diferentes contextos, observamos em nosso estudo a promoção de contribuições que acreditamos serem significativas para o campo da pesquisa dirigido ao ensino e aprendizagem de tópicos fundamentais da MQ.

O principal avanço desta investigação relaciona-se ao vínculo dos mecanismos externos de mediação embarcados nas instruções didáticas e o estabelecimento interpretativo dos licenciandos manifestado em suas formas de modelizações científicas privadas. Isto quer dizer que as representações mentais e *drivers* desenvolvidos e articulados pelos estudantes na etapa

final de análise dos experimentos da dupla fenda e do IMZ fundamentam-se essencialmente nas bancadas virtuais e sobretudo nos *storyboards* com representações gráficas específicas.

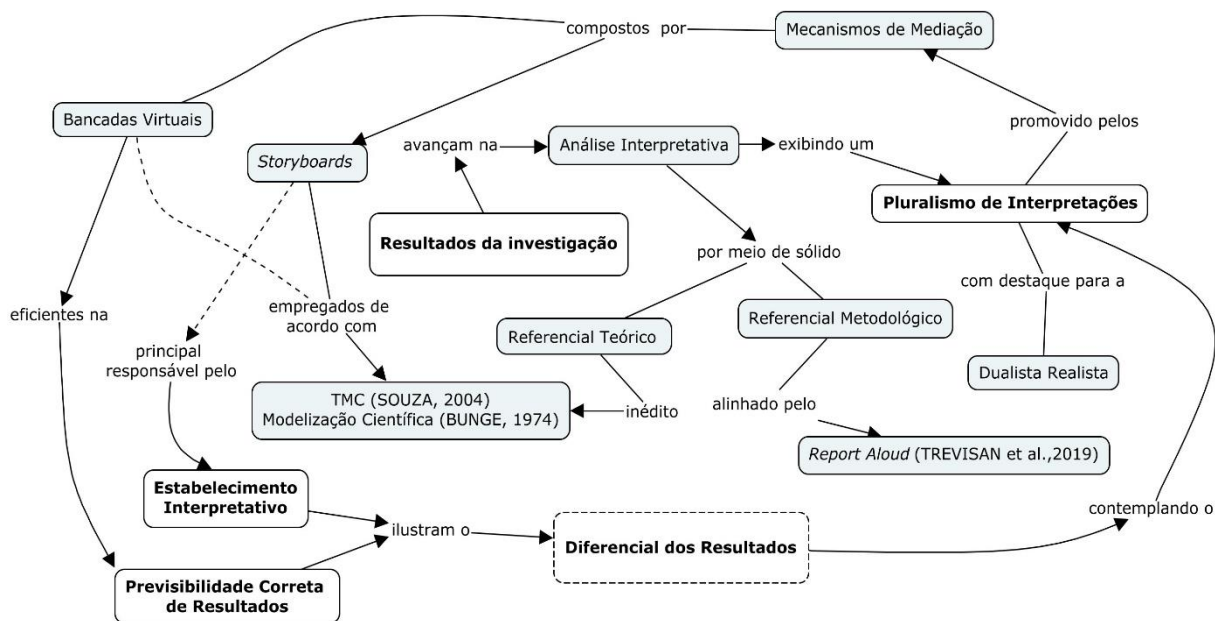
Como observado na descrição e análise dos resultados da seção anterior (ver 6.6) os quatro principais grupos interpretativos da MQ foram contemplados pelo grupo de licenciandos, que ao se depararem com exposições teóricas de igual importância no conteúdo dos *storyboards*, assumem a postura interpretativa que mais lhe favorecem na compreensão e explicação dos resultados (estes considerados consolidados por sociedades científicas).

Em nossa revisão de literatura não encontramos estudos que levantaram evidências de cunho qualitativo por meio da linguagem verbal e gestual descritiva para identificar e analisar o perfil interpretativo de estudantes em cursos introdutórios de MQ. Em termos gerais, a preocupação ocorre com a previsibilidade correta dos resultados atrelada com a correta aplicação do formalismo, omitindo variações interpretativas nas compreensões dos fenômenos.

Entretanto, nossos resultados mostram que os alunos carregam em sua bagagem cultural representações mentais para o comportamento do elétron e do fóton, e as utilizam na tentativa de compreensão dos padrões formados no anteparo de visualização da dupla fenda e do IMZ. Sendo assim, julgamos oportuno que o professor aborde em suas aulas a questão interpretativa, com o intuito de estabelecer conjecturas teóricas que direcionem em certo grau axiomático estas representações mentais pré-concebidas. Além do mais, corroborando com a pluralidade interpretativa do grupo de licenciandos, o professor ao tratar da questão interpretativa, não deve adotar apenas uma corrente de interpretação como correta, omitindo as demais, bem como a omissão dos debates relacionados a essa temática ao longo de décadas. Portanto, nos cursos introdutórios de MQ, pode ocorrer a promoção do estudo das principais interpretações sem prejudicar o aprendizado do formalismo da MQ.

Dentro desta ótica, e considerando a construção da revisão de literatura, nossos resultados remetem a um relevante avanço na contribuição com a pesquisa que almeja engendrar caminhos que conduzam possíveis melhorias no ensino e assimilação dos fenômenos fundamentais da MQ. A Fig. 165 exhibe um olhar generalizado acerca da distinção dos resultados.

Figura 165 – Síntese dos resultados direcionados à análise interpretativa.



Fonte: O autor.

Assim, à luz dos resultados obtidos nesta pesquisa e levando em consideração os apontamentos de estudos anteriores, julgamos importante o desenvolvimento de ações pedagógicas que não se confinem apenas na abordagem tradicional da MQ, carregada de procedimentos algébricos, já que, nesses cursos introdutórios, os estudantes, em sua grande maioria, generalizam suas concepções intuitivas da física clássica para os sistemas quânticos, podendo levá-los a uma aprendizagem deficitária.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta investigação teve seu início com o propósito de delinear subsídios teóricos e metodológicos que contribuam com o desenvolvimento conceitual e interpretativo dos licenciandos em Física acerca do fenômeno da dualidade onda-partícula incorporado em experimentos tradicionais, como o da dupla fenda e do Interferômetro de Mach-Zehnder, ambos com presença cativa em planos de ensino das disciplinas introdutórias de Mecânica Quântica.

Para alcançar esse objetivo, construímos um cenário de estudo que nos conduziu ao encontro de respostas para a seguinte questão principal: *O uso didático de mecanismos externos de mediação, com representações visuais específicas para o objeto quântico, construídas de acordo com suas principais interpretações, promove o estabelecimento do licenciando em Física em uma corrente interpretativa da Mecânica Quântica?* Assim, os desdobramentos da pesquisa convergem para a construção e a implementação de mecanismos externos de mediação, direcionados ao ensino da dualidade onda-partícula, e a posterior pretensão do estabelecimento de uma relação entre essas mediações com as representações mentais e *drivers* modelizados de acordo com a postura interpretativa manifestada pelos licenciandos.

Neste tocante, os movimentos iniciais de sinalização das respostas para a pergunta central originam-se dos resultados alcançados para as duas questões auxiliares desta investigação. A primeira, preocupou-se com a capacidade das representações específicas do objeto quântico, alusivas às quatro principais interpretações da MQ, para o preenchimento das lacunas interpretativas que ocorrem após o uso de experimentos virtuais. Enquanto a segunda, destinou-se a verificar se após observar a modelização, realizada sob perspectiva das quatro principais interpretações da MQ, acerca da compreensão conceitual do experimento de dupla fenda, o estudante é capaz de transpor sua interpretação de escolha de forma autônoma e não solicitada para o IMZ.

Tendo em vista o universo dos resultados levantados, identificamos as potencialidades das representações específicas presentes nos *storyboards* na influência das descrições apresentadas pelos licenciandos para o comportamento dos objetos quânticos. Os resultados nos anteparos das diferentes configurações experimentais, na maioria dos casos, são remetidos a lembranças das bancadas virtuais, **mas a evolução do objeto quântico nos setups experimentais seguiu definições ontológicas e epistemológicas baseadas nas representações específicas dos *storyboards*.**

Ainda que ilustrações esféricas ou de ondas circulares e senoidais para caracterizar o elétron e o fóton também tenham sido observadas em momentos anteriores às instruções

didáticas, as suas articulações conceituais para justificar a ocorrência ou não dos padrões de interferência são geralmente referenciadas aos *storyboards*. Quando comparados os dois momentos de *report aloud*, antes e após as instruções didáticas, foi possível observar as evidências de uma adição interpretativa aos resultados por parte dos licenciandos. Isso quer dizer que, mesmo com o acerto do resultado experimental, a compreensão conceitual acerca da natureza do objeto quântico nesta perspectiva empírica, não alcançava justificativas coerentes, contudo, após a interação com os *storyboards*, essa inconsistência foi consideravelmente reduzida.

Um exemplo que pode ser mencionado é a previsibilidade do resultado de interferência no anteparo de visualização para o experimento da dupla fenda em regime quântico sem observador, na qual os estudantes adotavam comportamento ondulatório ou principalmente corpuscular para o elétron, mas não eram capazes de explicar o motivo das formações das franjas claras e escuras. Isto é, as representações mentais e *drivers* prévios não eram suficientes para compreender os resultados experimentais visualizados nas bancadas virtuais, sendo que após o estudo com os *storyboards* essas representações e *drivers* modificaram-se e os resultados observados no anteparo, na sua maioria, podem ser explicados independente da corrente interpretativa adotada.

A modelização científica espontânea, mencionada em nossa segunda pergunta auxiliar, também pode ser constatada. Sob perspectiva das quatro principais correntes interpretativas da MQ, estudadas no contexto experimental da dupla fenda, a maioria dos licenciandos foi capaz de transpor suas interpretações de forma autônoma e não solicitada para o IMZ. Desse modo, as representações mentais e *drivers* empregados na compreensão do experimento da dupla fenda são redirecionadas para o arranjo experimental do IMZ, isso quer dizer, por exemplo, que o licenciando, ao estabelecer uma tendência dualista realista na explicação do padrão de interferência formado na dupla fenda em regime quântico, também faz uso dessa interpretação ao descrever o comportamento do objeto quântico no IMZ e ao justificar o resultado de interferência no anteparo.

Conforme exemplificado na análise dos resultados, ocorre, na explicação dos licenciandos, situações em que os espelhos semirrefletores são considerados análogos à dupla fenda. Essa comparação é um indício de modelização do comportamento do objeto quântico com fundamentação teórica oriunda das representações conceituais dos *storyboards*. Portanto, podemos considerar que a sequência do processo de modelização no entendimento dos arranjos experimentais do IMZ tem início com a assimilação das conjecturas teóricas das correntes interpretativas inerentes à dupla fenda.

Em face ao que foi exposto, caminhamos para as considerações acerca do estabelecimento dos licenciandos em Física em uma das quatro principais interpretações da MQ. De fato, os resultados emergidos nesta investigação nos possibilitam inferir a instituição dos estudantes, ainda que de forma incipiente, em uma dessas reconhecidas correntes interpretativas da MQ.

O reconhecimento das representações mentais e *drivers* externalizados pelos alunos nos diferentes momentos do estudo oportunizaram a verificação das interpretações privadas dos estudantes, as quais, pelas suas conjecturas, foram comparadas com as quatro principais interpretações da MQ. Por meio da comparação entre os dois momentos do *report aloud*, nota-se que as bancadas virtuais, e sobretudo os *storyboards*, foram os mecanismos externos de mediação responsáveis pelo estabelecimento interpretativo, mesmo que ainda de forma embrionária.

Conforme sinalizado na análise dos resultados, os princípios da interpretação dualista realista foram os que apareceram com frequência superior às demais. Acreditamos que, em nível epistemológico, a atitude realista na descrição do objeto quântico parte da necessidade de definição *a priori* de uma entidade física, seja ela quântica ou não. A ontologia dual nos parece advinda da carga cultural já adquirida pelos estudantes, haja visto em seus diálogos a frequente reprodução de frases aleatórias a respeito da dualidade onda-partícula do fóton e elétron, as quais são disseminadas em textos de divulgação científica e principalmente em vídeos em que não há preocupação com um rigor teórico, muitas vezes direcionados inclusive ao misticismo da MQ.

Apesar desses resultados positivos, identificamos deficiências conceituais e interpretativas tanto nos arranjos experimentais da dupla fenda quanto no IMZ, ambos com a presença de um detector/observador. Uma hipótese possível para a melhor assimilação conceitual nesse contexto, é que, em estudos futuros, seja dada mais ênfase ao princípio da incerteza e abordagens teóricas acerca da redução de estados.

Em relação aos delineamentos metodológicos adotados, sobretudo à utilização da técnica *Report Aloud*, destacamos a sua importância no comprimento dos propósitos desta investigação ao possibilitar a detecção e reconhecimento das representações mentais e *drivers* dos estudantes, bem como ao subsidiar os métodos que permitiram identificações das suas alterações na estrutura cognitiva dos licenciandos em Física.

O referencial teórico de aprendizagem, composto pela união da TMC com a Modelização Científica, inédito na pesquisa em Ensino de Ciências, fundamentou e conduziu os passos seguidos pelo estudo, sendo também suficientes e representativos na leitura dos dados

e asserções de conhecimento. Além do mais, as bancadas virtuais utilizadas por meio de guias de atividades baseados no P.O.E. e os *storyboards*, com representações conceituais específicas, apresentaram-se como processadores externos de informação, que proporcionaram aos alunos a visualização e a modelização do fenômeno da dualidade onda-partícula nos contextos experimentais virtuais da dupla fenda e do IMZ.

Neste tocante, acreditamos que uma importante contribuição deste estudo para o âmbito da pesquisa em Ensino de Ciências seja a articulação de referenciais teóricos e metodológicos, que, ao serem adotados para a presente pesquisa, promoveram a identificação de progressos conceituais e interpretativos dos estudantes acerca do tema da dualidade onda-partícula, assunto este tido como fundamental em cursos introdutórios de MQ para futuros professores de Física.

Por fim, entendemos que se deva ampliar a estruturação de metodologias e estratégias didáticas que deem ênfase à instrução conceitual e interpretativa dos fenômenos quânticos, principalmente em cursos de formação de professores, sem negligenciar os caminhos matemáticos básicos e necessários para a construção do formalismo quântico. Concordamos, portanto, com uma equidade nos processos de ensino das disciplinas introdutórias de MQ, já que, de acordo com a literatura, grande parte dos cursos prioriza os algoritmos de resolução, deixando a interpretação conceitual dos fenômenos em segundo plano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDURRAHMAN, A. S.; UMAM, R. The effect of feedback as soft scaffolding on ongoing assessment toward the quantum physics concept mastery of the prospective physics teachers. **Journal Pendidikan IPA Indonesia**, v. 7, n. 1, 2018.
- AKARSU, B. Einstein's redundant triumph" quantum physics": An extensive study of teaching/learning quantum mechanics in college. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 4, n. 2, p. 3, 2010.
- AMARAL, M. et al. Uma experiência para definição de storyboard em metodologia de desenvolvimento colaborativo de objetos de aprendizagem, **Ciência & Cognição**, v. 15, n. 1, 2010.
- AMÉRICO, M. Mapas Conceituais e Storyboard como Metodologia para a Produção de Aplicativo Gamificado para o Ensino de Ciências, **Redes.com**, n. 14, 2016.
- ANDERSON, J. R. Arguments concerning representations for mental imagery. **Psychological Review**, v. 85, n. 4, p. 249, 1978.
- APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da Ciência: Filosofia e Prática da Pesquisa**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- AUSUBEL, D. P. **Educational psychology: a cognitive view**. New York: Holt, Rinehart and Winston. 1968.
- AYENE, M.; KRIEK, J.; DAMTIE, B. Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 7, n. 2, p. 020113, 2011.
- BACKER, S. E.; EDWARDS, R. How many qualitative interviews is enough? Expert voices and early career reflections on sampling and cases in qualitative research. **National Center for Research Methods**. 2012.
- BAILY, C.; FINKELSTEIN, N. D. Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v.6, n. 1, p. 010101, 2010.
- BAILY, C; FINKELSTEIN, N. D. Teaching quantum interpretations: Revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 11, n. 2, p. 020124, 2015.
- BENITE, A. M. C. et al. Cybercultura em Ensino de Química: Elaboração de um objeto virtual de aprendizagem para o ensino de modelos atômicos, **Cibercultura em ensino em Química**, v. 33, n. 2, 2011.
- BETZ, M. Elementos de mecânica quântica da partícula na interpretação da onda piloto. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 4310, 2014.

BOGDAN, R. S.; BIKEN, S. **Investigação qualitativa em educação**: uma introdução à teoria e aos métodos. Porto: Porto, 1999.

BONILLA, M. H.; PRETTO, N. Movimentos colaborativos, tecnologias digitais e educação. **Em Aberto**, v. 28, n. 94, 2015.

BRANDÃO, R. V.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. A modelagem científica vista como um campo conceitual. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 28, n. 3, p. 507-545, 2011.

BROWN, B.; MASON, A.; SINGH, C. Improving performance in quantum mechanics with explicit incentives to correct mistakes. **Physical Review Physics Education Research**, v. 12, n. 010121, 2016.

BUNGE, M. **Filosofia da Física**: edições 70, Lisboa, Portugal, 1973.

BUNGE, M. **Teoria e Realidade**: editora Perspectiva S.A., São Paulo, 1974.

CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F.; LIMA, N. W.; NETTO, J. S. Software-aided discussion about classical picture of Mach–Zehnder interferometer. **European Journal of Physics**, v. 38, n. 6, 2017.

CHEONG, Y. K.; SONG, J. Different levels of the meaning of wave-particle duality and a suspensive perspective on the interpretation of Quantum Theory, **Science & Education**, Publicação Online, Ago. 2013. DOI 10.1007/s11191-013-9633-2

CLEMENT, J. J.; STEPHENS, A. L. Documenting the use of expert scientific reasoning process by high school physics students. **Physics Education Research**, v. 6, n. 2, p. 20122–1 – 20122–15, 2010.

CLERMONT, M.; DYCKHOFF, H. Coverage of business administration literature in Google Scholar: analysis and comparison with EconBiz, Scopus and Web of science. **Bibliometrie-Praxis und Forschung**, 1(1), 2012.

COSTA, F. A. **Concepção de sistemas de formação multimédia**: elaboração de um Guião de Autor. 1998. Disponível em: <<http://www.minerva.uevora.pt/simposio/comunicacoes/fcosta/guiautor.htm>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

CUPANI, A; PIETROCOLA, M. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. n. especial, p. 100-125, 2002.

DE AMBROSIS, A.; MALGIERI, M.; ONORATO, P. Design and refinement of an introductory teaching-learning sequence in quantum Physics. In: J. Lavonen, K. Juuti, J. Lampiselkä, A. Uitto & K. Hahl (Eds.), **Electronic Proceedings of the ESERA Conference**. Science education research: Engaging learners for a sustainable future, 5, 720-731. Helsinki, Finland: University of Helsinki. ISBN 978-951-51-1541-6. 2016.

DE AMBROSIS, A.; MALGIERI, M.; ONORATO, P. Test on the effectiveness of the sum over paths approach in favouring the constructions of an integrated knowledge of quantum physics in high school. **Physical Review Physics Education Research**, v. 13, n.1, jan-jul, 2017.

DINI, V; HAMMER, D. Case study of a successful learner's epistemological framings of quantum mechanics. **Physical Review Physics Education Research**, v. 13, n. 010124, 2017.

DOERR, H.M. Experiment, Simulation and Analysis: An integrated Instructional Approach to the Concept of Force. **International Journal of Science Education**, v.19, n.3, p. 265-282, 1997.

EISENCK, M.W. e KEANE, M.T. **Psicologia cognitiva**: um manual introdutório. Porto Alegre, RS: Artes Médicas, 1994.

ERICKSON, F. Qualitative methods in research on teaching. In Wittrock, M.C. (Ed.). Handbook of research on teaching. New York: **Macmillan Publishing**. p. 119-161. 1986.

EMIGH, P. J.; PASSANTE, G.; SHAFFER, P. Developing and assessing tutorials for quantum mechanics: Time dependence and measurements. **Physical Review Physics Education Research**, v. 14, n. 020128, 2018.

FANARO, M. A.; ELGUE, M. La conceptualización de la experiencia de la doble rendija a partir del enfoque de caminos múltiples de Feynman. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 13, n.2, 2018.

FERNANDES, R. F. A. M.; PIRES, F. F.; FORATO, T. C. M.; SILVA, J. A. Pinturas de Salvador Dalí para introduzir conceitos de Mecânica Quântica no Ensino Médio, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, ago. 2017, p. 509-529.

FERREIRA, D. C.; SOUZA FILHO, M. P. O experimento virtual da dupla fenda ao nível do ensino médio (Parte II): uma análise quântica do comportamento corpuscular e ondulatório da luz, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, abr. 2019, p. 302-329.

FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M. **Lições de Física** - The Feynman lecture on Physics. Porto Alegre: Bookman, v.3, 2008.

FISCHLER, H., LICHTFELDT, M. Modern physics and students' conceptions. **International Journal of Science Education**, London, v. 14, n. 2, p. 181-190, Apr./June 1992.

FLICK, U. **Desenho da pesquisa qualitativa**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

GILMORE, R. **Alice no país do quantum**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

HALEVI, G.; MOED, H.; BAR-ILAN, J. Suitability of Google Scholar as a source of scientific information and as a source of data for scientific evaluation—Review of the literature. **Journal of informetrics**, v. 11, n.4, p. 823-834, 2017.

- HILGER, T. R.; MOREIRA, M. A. A study of social representations of Quantum Physics held by High School students through numerical and written word association tests. **Revista Electrónica de Investigación en Educación em Ciências** (En línea), v. 8, p. 52-61, 2013.
- HILGER, T. R.; STIPCICH, M. S.; MOREIRA, M. A. Representações Sociais sobre Física Quântica entre estudantes de graduação brasileiros e argentinos, **Lat. Am. J. Phys. Educ.**; v. 11, n. 1, mar. 2017.
- HOEHN, J. R.; FINKELSTEIN, N. D. Students' flexible use of ontologies and the value of tentative reasoning: Examples of conceptual understanding in three canonical topics of quantum mechanics. **Physical Review Physics Education Research**, v. 14, n. 010122, 2018.
- HOEHN, J. R.; GIFFORD, J. D.; FINKELSTEIN, N. D. Investigating the dynamics of ontological reasoning across contexts in quantum physics. **Physical Review Physics Education Research**, v. 15, n. 010124, 2019.
- HOSTETTER, A.; ALIBALI, M. On the tip of the mind: gesture as a key to conceptualization. In: FORBUS, K. G.; GENTNER, D.; REGIER, T. (ed.). **Proceedings of the 26th annual meeting of the Cognitive Science Society**. Newark: Lawrence Erlbaum, 2004. p. 589-594. Disponível em: <https://cloudfront.escholarship.org/dist/prd/content/qt0bq3923m/qt0bq3923m.pdf?t=op32b6>. Acesso em: 25 ago. 2017.
- IRESON, G. The quantum understanding of pre-university physics students, **Physics Education**. v.35, n.1, 2000.
- JOHNSTON, I. D., CRAWFORD, K., FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**, London, v. 20, n.4, p. 427-446, 1998.
- KIZILCIKI, H.; YAVAS, P. Ü. Pre-service Physics Teachers' Opinions about the Difficulties in Understanding Introductory Quantum Physics Topics. **Journal of Education and Training Studies**, v. 5, n. 1, 2016. DOI:10.11114/jets.v5i1.
- KOHNLE, A.; BENFIELD, C. Interactive simulations to support quantum mechanics instruction for chemistry students, **Journal of Chemical Education**, fev. 2017, p. 392-397.
- KÖRHASAN, N. D.; MILLER, K. Students' mental models of wave-particle duality. **Canadian Journal of Physics**, 2019. DOI: 10.1139/cjp-2019-0019.
- KRAUSS, R. M. "Why do we gesture when we speak?" **Current Directions in Psychological Science**, Thousand Oaks, v. 54, n. 7, p. 54-60, 1998.
- KRIJTENBURG, K.; POL; A. B.; JOOLINGEN, W. R. van. Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. **Physics Review Physical Education**, n. 13, 2017.
- LIMA, L. G., RICARDO, E. C. O Ensino da Mecânica Quântica no nível médio por meio da abstração científica presente na interface Física-Literatura, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, abr. 2019, p. 8-54.

LIMA, N. W.; SOUZA, B. B.; OSTERMANN, F. Um Estudo Metalinguístico sobre as Interpretações do Fóton nos Livros Didáticos de Física Aprovados no PNLDEM 2015: Elementos para uma Sociologia Simétrica da Educação em Ciências. **Revista Brasileira de Educação em Ciências**, v.18, n.1, 2018.

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

MALGIERI, M.; ONORATO, P.; DE AMBROSIS, A. Test on the effectiveness of the sum over paths approach in favoring the construction of an integrated knowledge of quantum physics in high school. **Physical Review Physics Education Research**. v.13, n.1, 2017.

MANNILA, K.; KOPONEN, I. T.; NISKANEN, J. A. Building a picture of students' conceptions of wave-and particle-like properties of quantum entities, **European Journal of Physics**, v. 23, n. 1, 2002.

MARIES, A.; SAYER, R.; SINGH, C. Effectiveness of interactive tutorials in promoting “which-path” information reasoning in advanced quantum mechanics. **Physical Review Physics Education Research**, v. 13, n. 2, p. 020115, 2017.

MARSHMANN, E.; SAYER, R.; HENDERSON, C.; SINGH, C. Contrasting grading approaches in introductory physics and quantum mechanics: The case of graduate teaching assistants, **Physics Review Physical Education**, n. 13, 010120, mai. 2017.

MARSHMAN, E.; SINGH, C. Interactive tutorial to improve student understanding of single photon experiments involving a Mach–Zehnder interferometer. **European Journal of Physics**, v. 37, n. 2, p. 024001, 2016.

MARSHMAN, E; SINGH, C. Investigating and improving student understanding of the expectation values of observables in quantum mechanics. **European Journal of Physics**, v. 38, n. 4, 2017.

MATTHEWS, M. R. Mario Bunge: Physicist, philosopher and defender of science. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, Buenos Aires, v. 4, p.1-9, 2009.

MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 6, n. 020121, p. 1-17, 2010.

MEIER, J. J.; CONKLING, T. W. Google Scholar's coverage of the engineering literature: an empirical study. **The Journal of Academic Librarianship**, 34(3), 196-201, 2008.

MEIRINHOS, M.; OSÓRIO, A. O estudo de caso como estratégia de investigação em educação. **EduSer-Revista de educação**, v. 2, n. 2, 2016.

MERRIAM, S.B. **Qualitative Research and Case Study Applications in Education**. San Francisco: Allyn and Bacon, 1998.

MONAGHAN, J. M.; CLEMENT, J. J. Use of a computer simulation to develop mental simulations for understanding relative motion concepts. **International Journal of Science Education**, v. 21, n. 9, p. 921 – 944, 1999.

MONTENEGRO, R.L.; PESSOA JR., O. Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. **Investigações sobre Ensino de Ciências**, v.7, n.2, 2002.

MORAES, R; GALIAZZI, M. C. **Análise Textual Discursiva**. Ijuí: Editora Unijuí, 2007.

MOREIRA, M. A. Modelos mentais. **Investigações em ensino de ciências**, v. 1, n. 3, p. 193-232, 1996.

MOREIRA, M. A. Modelos científicos, modelos mentais, modelagem computacional e modelagem matemática: aspectos epistemológicos e implicações para o ensino. **Revista Brasileira de Ensino de C & T**, v. 7, nº 2, 2014.

MOURA, M. D.; SANTOS, R. P. dos, Detectando misticismo quântico em livros publicados no Brasil com ciência de dados. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 725-744, 2017.

MÜLLER, R.; WIESNER, H.. Teaching Quantum Mechanics on a introductory level. **American Journal of Physics**, 70, 3, 200-209, 2002.

MUSSATO, G. A. **Ontologia e epistemologia na educação científica**. Porto Alegre, 2018. 157 p. Tese (Doutorado) – PUCRS, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/8408>>. Acesso em: 16 set. 2019.

NETTO, J. S.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. Fenômenos intermediários de interferência e emaranhamento quânticos: o interferômetro virtual de Mach-Zehnder integrado a atividades didáticas, **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, abr. 2018, p. 185-234.

OLIVEIRA, R. S.; CARISSIMI, A. S.; TOSCANI, S. S. Sistemas operacionais. **Revista de informática teórica e aplicada**. Porto Alegre. Vol. 8, n. 3, p. 7-39, 2001.

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

OSTERMANN, F. et al. Fundamentos da Física Quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 3, 2009.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Física contemporânea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 18, n. 3, p. 391-404, 2000.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193–203, 2005.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. Conceitos de Física Quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.22, n.1, p. 9-35, 2005.

OTERO, M. R. El uso de imágenes en la educación em ciencias como campo de investigación. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 17, n. 1, p. 09-22, 2004.

PANTOJA, G. C. F.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**. v. 4, n.3, 2011, p. 1-34.

PEDERSEN, M. K.; SKYRUM, B.; HECK, R.; MÜLLER, R.; BASON, M.; LIEBEROTH, A. Virtual learning environment for interactive engagement with advanced quantum mechanics, **Physics Review Physical Education**, n. 12, 013102, abr. 2016.

PEREIRA, A.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. On the use of a virtual Mach–Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. **Physics Education**, v. 44, n. 3, p. 281, 2009.

PESSOA JR, O. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Livraria da Física, v. 2, 2008.

PESSOA JR, O. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Livraria da Física, v.1. 2006.

PESSOA JR, O. Interferometria, Interpretação e Intuição: uma Introdução Conceitual a Física Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, 1997.

PIEPER, F. C. **Um estudo do processo de internalização de conceitos de eletromagnetismo utilizando software de simulação computacional tridimensional**. 2019. 230 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2019.

PIETROCOLA, M. Construção e Realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em Ensino de Ciências**, v.4, n.3, Porto Alegre, 1999.

PONTE, J. P. O estudo de caso na investigação em educação matemática. **Quadrante**, v. 3, n. 1, p. 3-18, 1994.

RAMOS, A. F. **Estudo do Processo de Internalização de Conceitos de Química Utilizando Software de Modelagem Molecular: Uma proposta para o ensino médio e superior**. 2015. 230 f. Tese (Doutorado - Ensino de Ciências e Matemática), Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2015.

RAUPP, D.; Serrano, A.; Martins, T. L. C.; SOUZA, B. C. Uso de um software de construção de modelos moleculares no ensino de isomeria geométrica: um estudo de caso baseado na teoria de mediação cognitiva. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 9, n. 1, p. 18-34, 2010.

ROCHA, C. R.; HERSCOVITZ, V. E.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura em publicações de 2010 a 2016 sobre o ensino de conceitos fundamentais de Mecânica Quântica. **American Journal of Physics Education**, v. 12, n. 1, p. 1360-1-1306–20, 2017.

SAVALL-ALEMANY, F.; DOMÈNECH-BLANCO, J. L.; GUIASOLA, J.; MARTÍNEZ-TORREGROSA, J. Identifying student and teacher difficulties in interpreting atomic spectra using a quantum model of emission and absorption of radiation. **Physical Review Physics Education Research**, v. 12, n. 010132, 2016.

SAYER, R.; MARIÉS, A.; SINGH, C. Quantum interactive learning tutorial on the double-slit experiment to improve student understanding of quantum mechanics. **Physical Review Physics Education Research**, v. 13, n. 010124, 2017.

SAYER, R.; MARSHMAN, E.; SINGH, C. Case study evaluating Just-In-Time Teaching and Peer Instruction using clickers in a quantum mechanics course. **Physical Review Physics Education Research**, v. 12, n. 020133, 2016.

SCHERR, R. E. Gesture analysis for physics education researchers. **Physical Review Special Topics - Physics Education Research**, v. 4, n.1, p.1 – 9, 2008.

SERRALTA, F. B.; NUNES, M. L. T.; EIZIRIK, C. L. Considerações metodológicas sobre o estudo de caso na pesquisa em psicoterapia. **Estudos de Psicologia (Campinas)**, v. 28, n. 4, p. 501-510, 2011.

SIDDIQUI, S.; SINGH, C. How diverse are physics instructors' attitudes and approaches to teaching undergraduate level quantum mechanics? **European Journal of Physics**, v. 38, n. 3, 2017.

SILVA, G. C.; SOUZA, P. M. O uso da realidade virtual para o ensino de física quântica. **Anais dos Workshops do CBIE**. Patos de Minas: UNIPAM, 2013.

SINGH, C. Student understanding of quantum mechanics. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 8, p. 885-895, 2001.

SINGH, C.; MARSHMAN, E. Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 11, n. 2, p. 020117, 2015.

SOUZA, Bruno. C.. **A Teoria da Mediação Cognitiva: os impactos cognitivos da hipercultura e da mediação digital**. 2004. 282 f. Tese (Doutorado - Curso de Psicologia), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

SOUZA, B. C.; A Teoria da Mediação Cognitiva. In: L. Meira & A. Spinillo (Org.). **Psicologia cognitiva: Cultura, Desenvolvimento e Aprendizagem**. Recife: Editora da UFPE. 2006.

SOUZA, B. C.; ROAZZI, A..Hipercultura e Inteligência. In A. Araujo Candeias; L. S. Almeida (Org). **Inteligência Humana: Investigação e Aplicações**,1 ed, v. 1, p. 97–114. Évora: Quarteto, 2007.

SOUZA, B. C.; ROAZZI, A. Testing the robustness of the hyperculture concept. In A. Cohen (Org.), **Facet theory and scaling in the search of structure in behavioral and social sciences**, p. 37–56. Jerusalém: Facet Theory Press, 2009.

SOUZA, B. C.; LIMA E SILVA, L. X.; ROAZZI, A. MMORPGS and cognitive performance: A study with 1280 Brazilian high school students. **Computers in Human Behavior**, v. 26, n. 6, p. 1564–1573, 2010.

SOUZA, B. C. et al. Putting the Cognitive Mediation Networks Theory to the test: Evaluation of a framework for understanding the digital age. **Computers in Human Behavior**, v. 007, p. 10.1016, 2012.

STEPHENS, A. L.; CLEMENT, J. J. Documenting the use of expert scientific reasoning process by high school physics students. **Physics Education Research**, v. 6, n. 2, p.1–15, 2010.

TAO, P. K.; GUNSTONE, R. F. A process of conceptual change in force and motion during computer-supported Physics instruction. **Journal of Research in Science Teaching**, v.3 7, n. 2, p. 859-882, 1999.

TREVISAN, R. **Um estudo da relação entre as imagens mentais utilizadas por estudantes de mecânica quântica e seu perfil epistemológico: uma investigação pela metodologia Report Aloud**. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2016.

TREVISAN, R.; SERRANO, A. A Utilização de Ferramentas Hiperulturais no Ensino de Mecânica Quântica: Investigação do Aprendizado de Representações, *Drivers* e Conceitos Quânticos. **RENOTE-Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 12, p. 1, 2014.

TREVISAN, R.; SERRANO, A. Uma construção do Perfil Epistemológico de licenciandos em Física acerca da dualidade onda-partícula em Mecânica Quântica, após o uso de bancadas virtuais: um estudo a partir do discurso gestual e verbal. **RENOTE-Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 14, n. 1, 2016a.

TREVISAN, R.; SERRANO, A. Um estudo da relação entre as imagens mentais utilizadas por estudantes de mecânica quântica e seu perfil epistemológico: uma investigação pela metodologia *report aloud*. **Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias**, v. 11, n. 2, p. 203-218, 2016b.

TREVISAN, R.; SERRANO, A. Investigando os Drivers e as Representações Mentais Presentes nas Interpretações Privadas de Estudantes de Mecânica Quântica. **Acta Scientiae**, v. 20, n. 4, 2018.

TREVISAN, R.; SERRANO, A. Bancadas virtuais e *storyboards* com ilustrações microscópicas representativas como recursos no estudo da Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática** (no prelo), 2019.

TREVISAN, R.; SERRANO, A.; WOLFF, J.; RAMOS, A. Peeking into students' mental imagery: the Report Aloud technique in Science Education research. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 3, p. 647-664, 2019.

VARGAS, A. et al. Pomídia: produção de vídeos digitais no contexto educacional, **Revista Novas Tecnologias na Educação**, CINTED-UFRGS, v. 5, n. 2, dez, 2007.

VAN-SOMEREN, M. W.; BARNARD, Y. F.; SANDBERG, J. A. C. The Think Aloud Method: a practical guide to modeling cognitive processes. **Academic Press**. London, 1994.

WAGNER, S. M.; NUSBAUM, H.; GOLDIN-MEADOW, S. Probing the mental representation of gesture: Is handwaving spatial? **Journal of Memory and Language**, v. 50, n. 4, p. 395–407, 2004.

WESTPHAL, M.; PINHEIRO, T. C. A epistemologia de Mario Bunge e sua contribuição para o Ensino de Ciências. **Ciência & Educação**, Bauru, SP, v.10. n.3, p. 585-596, 2004.

WICHMANN, E. H. Berkeley physics course, vol. 4. **Quantum Physics**. MacGraw-Hill, 1971.

WOLFF, J. F. S. **As modificações de *drivers* prévios através da utilização de simulações computacionais: aprendizagem significativa dos conceitos de colisões verificadas através da análise das imagens mentais de estudantes universitários**. 2015. 260 f. Tese (Doutorado) - Ensino de Ciências e Matemática, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2015.

WUTTIPROM, S. et al. Development and use of a conceptual survey in introductory quantum physics. **International Journal of Science Education**, v.31, n.5, p. 631-654, 2009.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman. 2001.

ZHU, G.; SINGH, C. Improving students' understanding of quantum measurement. I. Investigation of difficulties. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 8, n. 1, p. 010117, 2012.

ANEXOS

ANEXO A – TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM, NOME E VOZ

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM, NOME E VOZ

Pelo presente instrumento particular de licença de uso de imagem, nome e voz, _____, portador(a) do CPF de nº _____, residente e domiciliado(a) na rua _____, nº _____, na cidade de _____ / _____, doravante denominado(a) Licenciante, autoriza a veiculação de sua imagem, nome e voz, gratuitamente por tempo indeterminado, por Robson Trevisan, portador(a) do CPF de nº XXXXXXXX, doravante denominada Licenciada.

Mediante assinatura deste termo, fica a Licenciada autorizada a utilizar a imagem, nome e voz do Licenciante no projeto intitulado Um estudo sobre a influência da Mediação Hipercultural na construção de conceitos fundamentais da Mecânica Quântica, para fins exclusivos de divulgação da Instituição e suas atividades, podendo, para tanto, reproduzi-la ou divulga-la junto à internet, ensino a distância, jornais e todos os demais meios de comunicação, público ou privado, sem qualquer contraprestação ou onerosidade, comprometendo-se a Licenciante a nada exigir da Licenciada em razão do ora autorizado.

Em nenhuma hipótese poderá a imagem, nome e voz do Licenciante ser utilizada de maneira contrária a moral, bons costumes e ordem pública.

E, por estarem de acordo, as partes assinam o presente instrumento em 02 (duas) vias, de igual teor e forma, para que produza entre si os efeitos legais.

_____, ____ de, _____ de _____.

Licenciante

No caso de menores de 18 (dezoito) anos, o documento obrigatoriamente devera ser assinado pelo Representante Legal.

Representante Legal

Nome: _____

RG: _____ CPF: _____

APÊNDICES

APÊNDICE A – GUIA DE ATIVIDADES I



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

Nome:
Nome fictício (preenchido pelo pesquisador):
Curso:
Semestre atual:
Data:

GUIA PARA UTILIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Nesta atividade você irá utilizar duas atividades de simulação computacional. As simulações que você irá utilizar são de experimentos que podem ser realizados em alguns laboratórios de pesquisa. Como estes experimentos são muito complexos para uso didático, e até mesmo excessivamente caros, utilizaremos aqui, estas simulações na tentativa de permiti-lo explorar este experimento virtualmente.

Este guia de utilização usa a técnica descrita como P.O.E. (Predizer-Observar-Explicar). Esta técnica tem sido utilizada com sucesso e consiste em fazer com que você, aluno, tente predizer o que vai ocorrer antes da simulação e registre, escrevendo, o que você espera que ocorra. Em seguida, você efetua a simulação, observando o que acontece e finalmente, compara o que você esperava que fosse acontecer com o que foi simulado, tentando explicar diferenças entre o observado e o previsto por você, caso ocorram diferenças. Pedimos que, portanto, você siga esta técnica, para aproveitar melhor o resultado do seu trabalho. Não tente simular o comportamento antes de ter refletido sobre o que irá acontecer e ter registrado neste guia a sua previsão. Isto irá apenas fazer com que você não aproveite totalmente os benefícios da atividade didática.

ATIVIDADE I: O EXPERIMENTO DA FENDA DUPLA

Esta simulação nos permite observar que, quando fazemos uma luz atravessar um par de fendas estreitas e muito próximas, um padrão de interferência será visualizado no anteparo. Vamos considerar o experimento em termos de arma de balas (ou areia), luz (fótons) e elétrons.

1- Fonte emitindo projéteis macroscópicos (balas)

Para rodar este programa, em EXPERIMENTO DE DUAS FENDAS, selecione na parte de baixo da janela do programa a língua ENGLISH, ao invés de DEUTSCH. Clique em OK.

- 1.1 Inicialmente selecione *source* e, em seguida, *gunballs*, na janela que irá aparecer. Em seguida, na janela *aperture* que determina a abertura e a distância entre as fendas, clique em *slit 1* e você visualizará apenas uma fenda (a fenda 2). Assim, você estará se preparando para simular o que acontece quando apenas balas (ou areias) passam por uma fenda.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que acontece na tela, quando retirada a fenda direita (*slit 1*).



(OBSERVAÇÃO) Então, clique no botão Θ que se encontra abaixo da arma, para iniciar a saída das bolas. Em seguida, abra a janela *screen* e clique em *evaluation*. A medida em que se preenchem os pontos na tela o número de pontos em cada posição é mostrado no gráfico *evaluation*, representando a contagem acumulada. Não esqueça que *speed* lhe fornecerá resultados mais rápidos. Desenhe abaixo o que você observou.

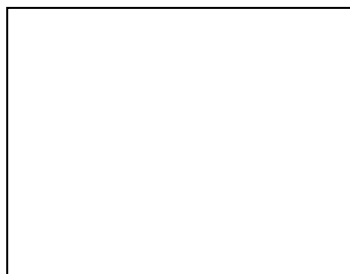


Gráfico (Evaluation)



Padrão formado

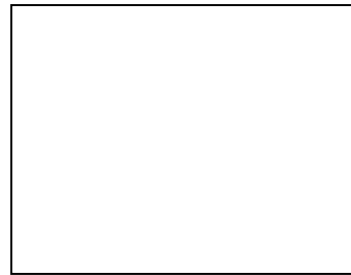
(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou (apenas para o padrão formado). Existem diferenças? Explique.

- 1.2 Agora, retire a fenda direita (*slit 1*) e acrescente a fenda esquerda (*slit 2*), selecionando desta forma a fenda esquerda.

(PREVISÃO) Esboce o padrão que será formado na tela branca e também o gráfico da contagem acumulada de acordo com a posição de colisão das balas no anteparo.



Gráfico

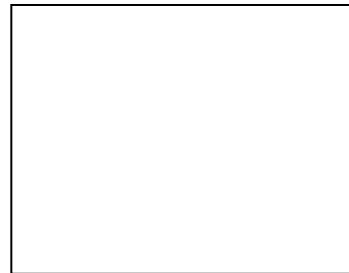


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Você já construiu o gráfico? Então, abra a janela *screen* e clique em *evaluation* para comparar os resultados.



Gráfico



Padrão Formado

(EXPLICAÇÃO) Compare seus resultados e explique as diferenças, se houver.

- 1.3 Ative agora as duas fendas na tela.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar.

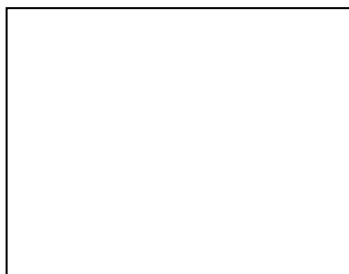


Gráfico



Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Simule o resultado das duas fendas ativadas e registre os resultados. Não esqueça dos valores acumulados, apertando *evaluation*.



Gráfico



Padrão Formado

(EXPLICAÇÃO) Existem diferenças entre o que você observou e o que você esperava que acontecesse? Explique o porquê das diferenças.

2- Fonte emitindo ELÉTRONS individuais

Um feixe de elétrons pode ser difratado da mesma maneira como pode ser difratado um feixe de fótons. Na simulação que segue, o procedimento é essencialmente o mesmo das atividades anteriores. Clique em *source* e selecione *electrons*.

- 2.1 Deixe a lâmpada apagada e retire a fenda esquerda. Na janela *aperture* altere para 226 nm a abertura da fenda e 1278 nm a distância entre elas. Na janela *source*, altere a energia para 14 KeV. Em seguida, na janela *aperture* que determina a abertura e a distância entre as fendas, clique em *slit 1* e você visualizará apenas uma fenda (a fenda 2). Assim, você estará se preparando para simular o que acontece quando elétrons passam por uma fenda.

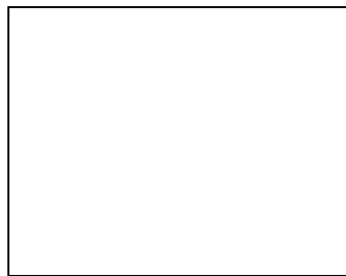
(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que acontece na tela, quando retirada a fenda esquerda (*slit 1*).



(OBSERVAÇÃO) Então, clique no botão Θ que se encontra abaixo da fonte, para iniciar a saída dos elétrons. Em seguida, abra a janela *screen* e clique em *evaluation*. A medida em que se preenchem os pontos na tela o número de pontos em cada posição é mostrado no gráfico *evaluation*, representando a contagem acumulada. Não esqueça que *speed* lhe fornecerá resultados mais rápidos. Desenhe abaixo o que você observou. (Utilize o zoom de 1.000x)



Gráfico (Evaluation)



Padrão formado

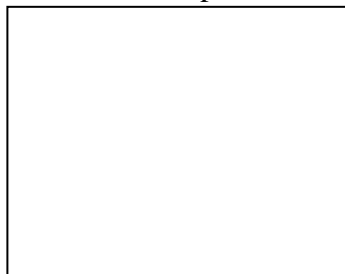
(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Existem diferenças? Explique.

➤ 2.2 Agora, retire a fenda esquerda (*slit 1*) e acrescente a fenda direita (*slit 2*), selecionando desta forma a fenda direita.

(PREVISÃO) Esboce o padrão que será formado na tela branca e também o gráfico da contagem acumulada de acordo com a posição de colisão dos elétrons no anteparo.

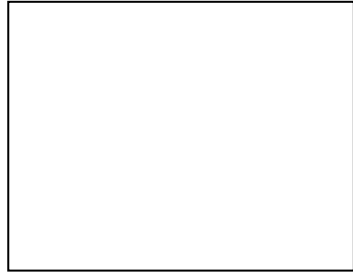


Gráfico

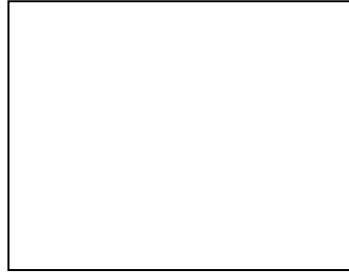


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Você já construiu o gráfico? Então, abra a janela *screen* e clique em *evaluation* para comparar os resultados.



Gráfico



Padrão Formado

(EXPLICAÇÃO) Compare seus resultados e explique as diferenças, se houver.

➤ 2.3 Ative agora as duas fendas.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar.



Gráfico

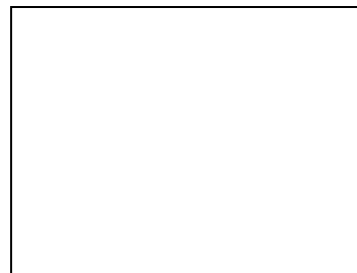


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Simule o resultado das duas fendas ativadas e registre os resultados. Não esqueça dos valores acumulados, apertando *evaluation*. **(Altere o zoom para 10.000x)**



Gráfico



Padrão Formado

(EXPLICAÇÃO) Existem diferenças entre o que você observou e o que você esperava que acontecesse? Explique.

- 2.4 Na próxima simulação, você deverá acender a lâmpada e não retirar as duas fendas. O que acontece ao acender juntos a lâmpada e a fonte de elétrons? Descreva os resultados obtidos e represente graficamente.



- 2.5 Na próxima simulação, você deverá acender a lâmpada e não retirar as duas fendas. Abra a janela *lamp* e selecione um comprimento de onda igual a 760 nm e intensidade de 30%, permaneça com a fonte ligada.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo os resultados esperados por você.



(OBSERVAÇÃO) Simule o arranjo experimental e desenhe o resultado obtido.



(EXPLICAÇÃO) Compare seus resultados e explique as diferenças, se houver.

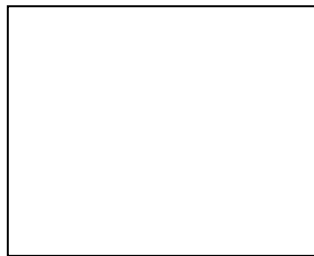
- 2.6 Altere a intensidade da lâmpada para 100%. O que está acontecendo? Explique.

3 – Fonte emitindo FÓTONS individuais

Agora, selecione a fonte, mais uma vez. Trabalhamos com balas (ou areia). Agora iremos repetir o experimento com a fonte emitindo FÓTONS. Clique em *source* e selecione *photons*.

- 3.1 Na janela *aperture* altere a abertura das fendas para $100\mu\text{m}$ (opção *slit-width*) e a distância (opção *slit-distance*) entre elas para $512\mu\text{m}$. Caso você não consiga exatamente estes valores, não importa, apenas que fique em valores próximos a estes. Em seguida, na janela *aperture* que determina a abertura e a distância entre as fendas, clique em *slit 1* e você visualizará apenas uma fenda (a fenda 2). Assim, você estará se preparando para simular o que acontece quando apenas luz passa por uma fenda. Clique em *screen* e altere o zoom para 1000x.

(PREVISÃO) Prediga e desenhe abaixo o que acontece na tela, quando retirada a fenda direita (*slit 1*).



(OBSERVAÇÃO) Então, clique no botão Θ que se encontra abaixo da fonte, para iniciar a saída dos fótons. Em seguida, abra a janela *screen* e clique em *evaluation*. A medida em que se preenchem os pontos na tela o número de pontos em cada posição é mostrado no gráfico *evaluation*, representando a contagem acumulada. Não esqueça que *speed* lhe fornecerá resultados mais rápidos. Desenhe abaixo o que você observou.

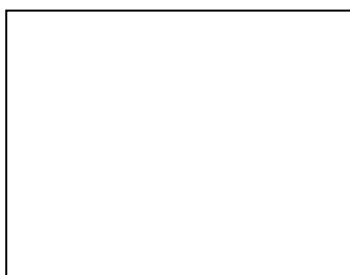


Gráfico (Evaluation)



Padrão formado

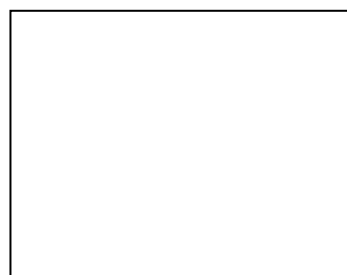
(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Existem diferenças? Explique.

➤ 3.2 Agora, retire a fenda direita (*slit 1*) e acrescente a fenda esquerda (*slit 2*), selecionando desta forma a fenda esquerda.

(PREVISÃO) Esboce o padrão que será formado na tela branca e também o gráfico da contagem acumulada de acordo com a posição de colisão dos fótons no anteparo.



Gráfico

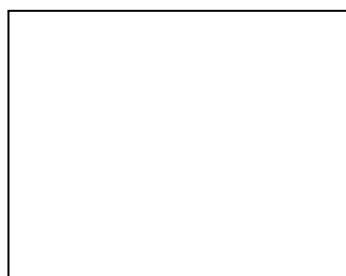


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Você já construiu o gráfico? Então, abra a janela *screen* e clique em *evaluation* para comparar os resultados.



Gráfico

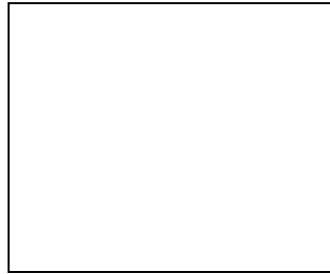


Padrão Formado

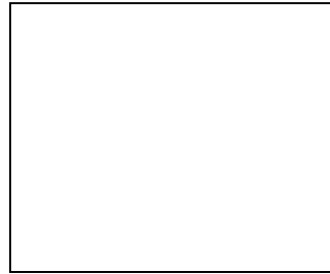
(EXPLICAÇÃO) Compare seus resultados e explique as diferenças, se houver.

➤ 3.3 Ative agora as duas fendas.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar.



Gráfico

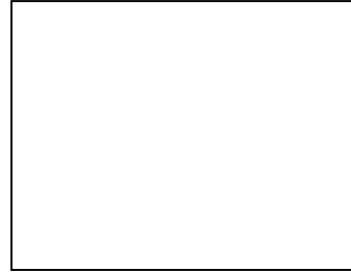


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Simule o resultado das duas fendas ativadas e registre os resultados. Não esqueça dos valores acumulados, apertando *evaluation*. Alterne de 1000x de zoom para 10.000x de zoom, na janela *screen*.



Gráfico



Padrão Formado

(EXPLICAÇÃO) Existem diferenças entre o que você observou e o que você esperava que acontecesse? Explique.

APÊNDICE B – GUIA DE ATIVIDADES II

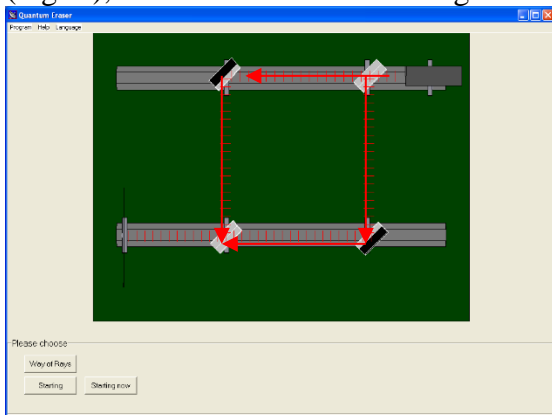


UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

Nome:
Nome fictício (preenchido pelo pesquisador):
Curso:
Semestre atual:
Data:

ATIVIDADE II: SIMULADOR *QUANTUM ERASER* (IMZ)

Para iniciar esta simulação, abra o programa *QUANTUM ERASER* e escolhendo a *linguagem* (inglês), clicando na bandeira da Inglaterra e, então, clicando *start*. Na janela que abrirá, clique em



WAY OF RAYS. Você visualizará (ilustrada à esquerda) um interferômetro, que separa um feixe luminoso em duas partes, cada qual seguindo caminhos diferentes um com o outro e então, os recombina para obter um padrão de interferência. Vamos utilizar este interferômetro para observar e analisar o comportamento de um laser e de fótons que irão incidir na tela branca. Assim que identificar a trajetória dos lasers, clique em **STARTING**.

1- Fonte emitindo um feixe de luz monocromático (laser)

- Inicialmente, vamos observar o comportamento de um feixe de luz proveniente de um laser, para isso, selecione **LASER**. Em seguida, clique em **detector 1**. Este detector permite saber se o feixe de luz laser passou por uma parte da trajetória. Ao detectar a luz, ele impede a passagem da mesma. Dessa forma, o feixe só passa pelo outro lado.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca, antes de ligar o dispositivo:



(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento do laser, clcando na lâmpada. Desenhe abaixo o que você observou.



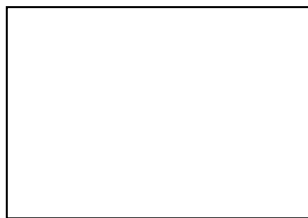
(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver:

- 1.2 Agora, apague a lâmpada. Clique em **detector 2** e clique também em **detector 1**. Dessa forma, você liga o detector 2 e desliga o detector 1.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca:



(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento do laser, clicando na lâmpada. Desenhe abaixo o que você observou.



(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver.

- 1.3 Agora, apague a lâmpada. Clique em *detector 1* apenas. Dessa forma, você liga ambos os detectores 1 e 2. Assim, o feixe será barrado.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca:



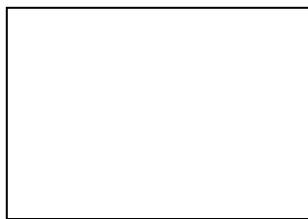
(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento do laser, clicando na lâmpada. Desenhe abaixo o que você observou.



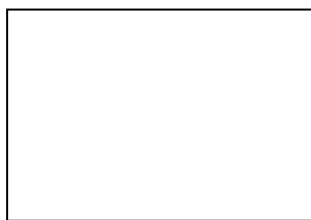
(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver.

- 1.4 Agora, o que acontecerá ao desligarmos os dois detectores, afim de deixarmos que AMBOS os feixes de raio laser passem? **Desligue a lâmpada**, para a etapa de previsão.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca:



(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento do laser, clicando na lâmpada. Desenhe abaixo o que você observou.



(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver:

Questionamentos:

- 1) Você observou padrões de interferência? Em qual parte do experimento?
- 2) Porque ocorre a interferência? O que interfere com o que?
- 3) A interferência pode ser explicada por você? Tem relação com superposição construtiva e destrutiva?

2- Fonte em regime monofotônico (fótons individuais)

Apague a lâmpada.

A próxima simulação exige que você altere a variável *laser* para *single photons*. Assim, o experimento passa a emitir fótons individuais, ao invés de luz laser. Antes, uma grande quantidade de fótons era emitida pela luz laser, como uma lâmpada. Milhões de fótons são emitidos por uma lâmpada comum. Como você observou, parte do feixe passa por um lado, e parte por outro.

- 2.1 A lâmpada agora é uma fonte de fótons individuais. Ela só permite a passagem de um fóton por vez. Agora, acrescente o *detector 1*. Note que agora o detector pode contar quantos fótons passaram por ele. Lembre-se que ele, ao detectar os fótons, bloqueia a passagem deles. Também é contado, para comparação, quantos fótons saíram do emissor. Assim, você pode descobrir por onde cada fóton individual passou! Inicialmente, esta contagem é zero para cada marcador.

(PREVISÃO) O que acontecerá ao ligarmos o emissor de fótons? Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca. Diga também, ao lado, qual a porcentagem de fótons que você espera medir no detector 1, em relação ao número total de fótons emitidos pela fonte:



R. _____

(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento dos fótons, clicando na lâmpada. Quantos fótons saem do emissor e chegam ao detector 1, em termos percentuais?

A opção **speed** (no programa) permite uma visualização mais rápida e você poderá clicar quantas vezes achar necessário. Assim, você faz o tempo passar bem rápido! Desenhe abaixo o que você observou na tela branca após clicar algumas vezes em **speed**:



R. _____

(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver, tanto para o desenho como para a percentagem:

➤ 2.2 Apague a lâmpada. Agora, acrescente o *detector 2* e retire o *detector 1*.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca. Diga ao lado qual a percentagem de fótons que você espera medir no detector 2:



R. _____

(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento dos fótons, clicando na lâmpada. Quantos fótons saem do emissor e chegam ao detector 2, em termos percentuais? Desenhe abaixo o que você observou na tela branca:



R. _____

(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver, tanto para o desenho como para a percentagem:

➤ 2.3 Apague a lâmpada. Agora, acrescente tanto o *detector 2* como o *detector 1*.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca. Diga ao lado qual a percentagem de fótons que você espera medir no detector 1 e no detector 2:



R. _____

(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento dos fótons, clicando na lâmpada. Quantos fótons saem do emissor e chegam aos detectores 1 e 2, em termos percentuais? Desenhe abaixo o que você observou na tela branca:

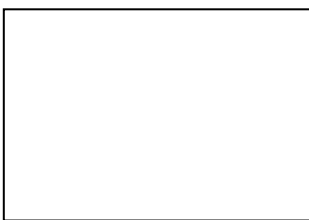


R. _____

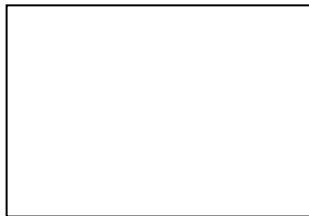
(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver, tanto para o desenho como para a percentagem:

➤ 2.4 Apague a lâmpada. Agora, retire ambos os *detectores 1 e 2*.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar na tela branca.



(OBSERVAÇÃO) Agora, SIMULE o comportamento dos fótons, clicando na lâmpada. Desenhe abaixo o que você observou na tela branca:



(EXPLICAÇÃO) Compare o que você previu com o que você observou. Explique a diferença, se houver.

Questionamentos:

- 1) Descreva o percurso do fóton no interferômetro.
- 2) Você observou padrões de interferência? Em qual parte do experimento?
- 3) Porque ocorre a interferência? O que interfere com o que?
- 4) Como é possível haver interferência, se apenas um fóton passa por segundo?

APÊNDICE C – TESTE I: IES “A”



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

Nome:
Nome fictício (preenchido pelo pesquisador):
Curso:
Semestre atual:
Data:

INSTRUMENTO PARA PRODUÇÃO DE DADOS: TESTE I

Caro Aluno,

Solicito sua colaboração, respondendo às questões formuladas a seguir. Este pré-teste tem por objetivo verificar se você possui conhecimentos prévios sobre alguns conteúdos de Física Moderna.

Este diagnóstico **NÃO ESTÁ** vinculado à disciplina e **NÃO** influirá nas avaliações feitas pelo professor. Agradecemos a você, por tornar esta coleta possível. Trata-se de uma pesquisa, não de uma avaliação discente.

1) Você já cursou ou está cursando alguma disciplina que envolva conteúdos da Teoria Quântica? Em caso positivo, qual?

1.1) Em caso de resposta positiva na questão anterior, você:

- (A) Atingiu a média suficiente para ser aprovado
- (B) Não atingiu média suficiente para se aprovado
- (C) Não atingiu frequência mínima nas aulas para ser aprovado
- (D) Você desistiu da disciplina antes do término do semestre
- (E) Outros. Qual?

1.3) Atualmente você está lecionando? Em caso positivo, escreva quais disciplinas e nível de ensino.

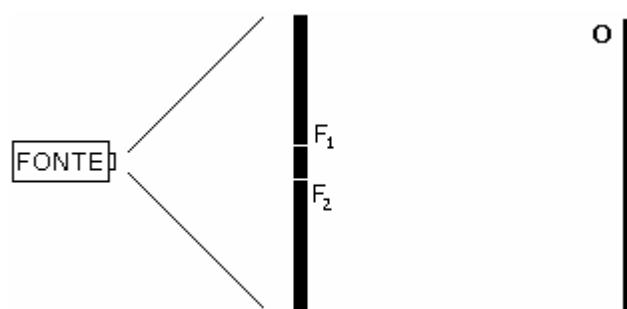
2) Existe alguma diferença entre um objeto microscópico e um macroscópico? Por exemplo, entre um elétron e um grão de areia. Explique sua resposta.

3) Explique, como se você estivesse explicando para um colega, o que é interferência. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

4) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um elétron. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

5) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um fóton. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

6) 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, F1 e F2, 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.

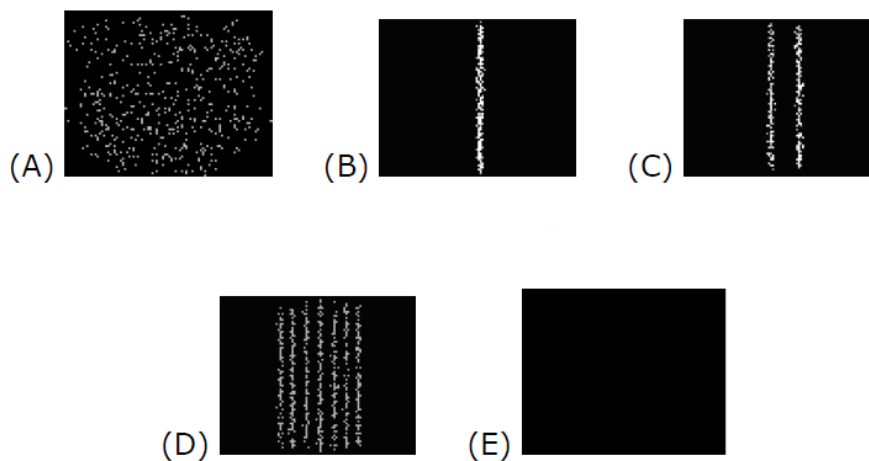
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

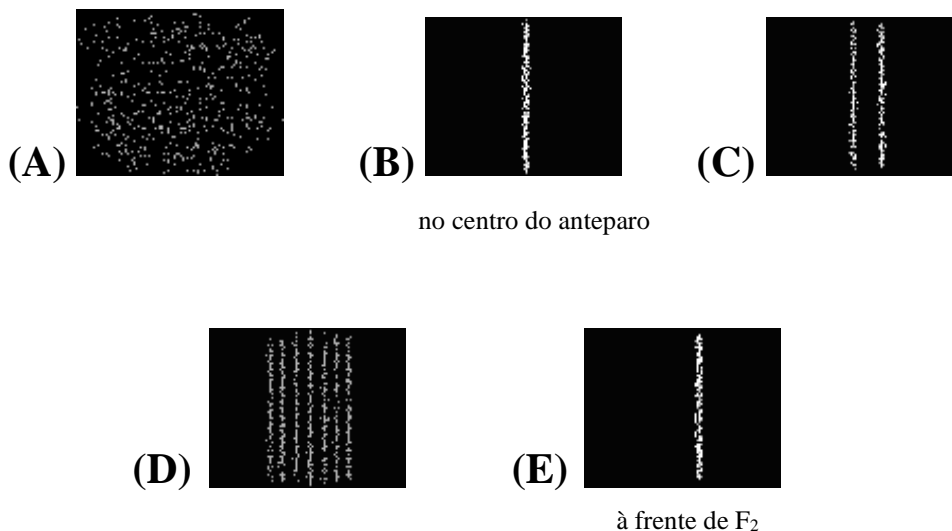
7)³³ Ainda observando o experimento apresentado na questão anterior: Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton por segundo fosse emitido de cada vez, e deixássemos o dispositivo ligado por 4 a 5 horas, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo?



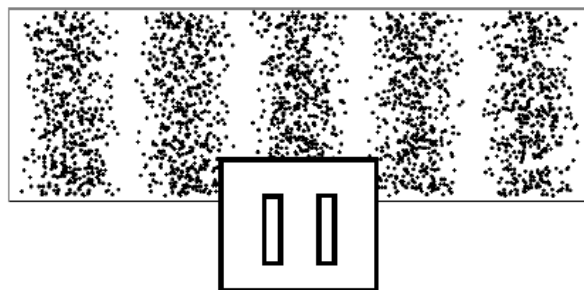
Por que você escolheu esta imagem?

³³ Questão extraída de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

8)³⁴ 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 F1?



9)³⁵ Você atira um feixe de fótons em uma tela através de um par de fendas. O feixe é tão fraco que os fótons chegam um por vez na tela, mas eventualmente eles constroem um padrão de interferência, como mostrado na figura a direita. O que você pode dizer sobre qual fenda qualquer fóton individual passou?



- Cada fóton passou ou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos determinar qual, sem mudar o padrão de interferência.
- Cada fóton passou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita, mas é fundamentalmente impossível determinar qual.
- Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton em ambos os locais ao mesmo tempo.

³⁴ Questão extraída de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

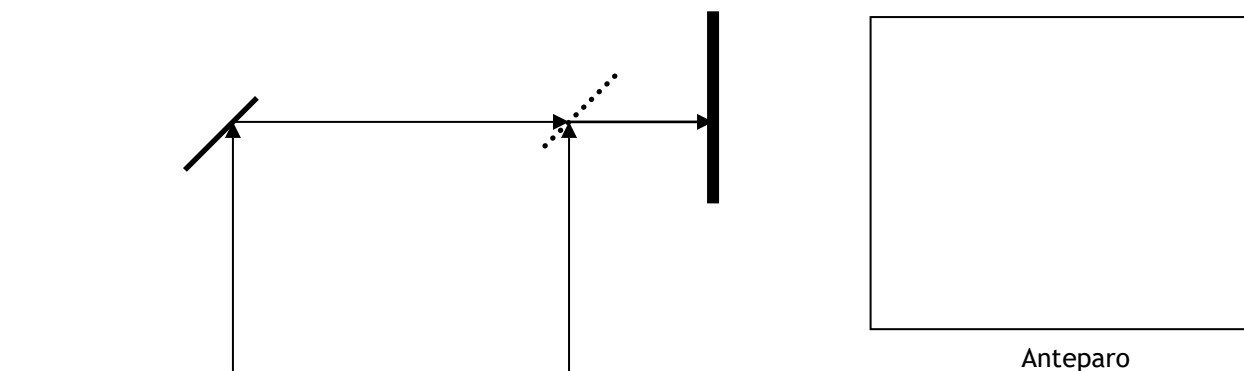
³⁵ Questão extraída de MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 6, n. 020121, p. 1-17, 2010.

d) Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton passando por uma ou por outra fenda, mas isso destruiria o padrão de interferência.

e) É impossível determinar se o fóton passou por uma fenda ou em ambas.

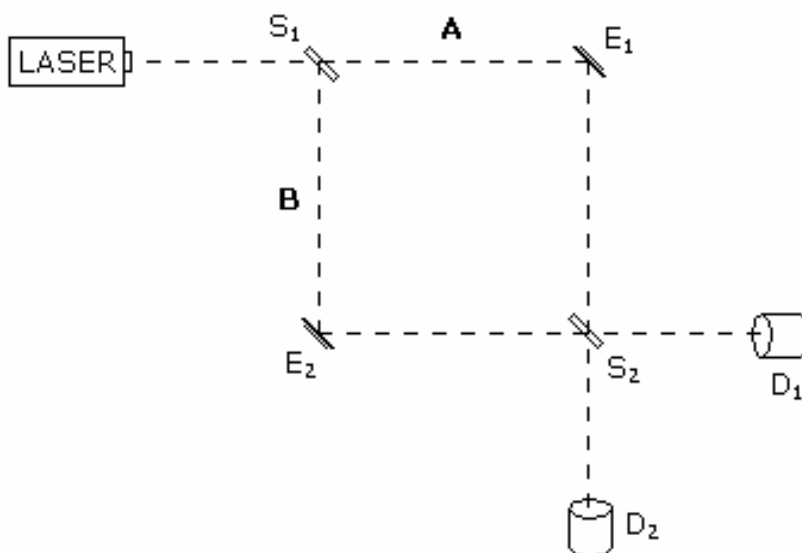
10) No esquema simplificado abaixo se encontra um espelho semi refletor que divide um feixe de fótons emitido pela fonte em dois. Após outro conjunto de espelhos, os feixes são novamente unidos.

O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



INSTRUÇÃO: As questões 11 a 15 referem-se ao enunciado abaixo³⁶.

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 recombinaem-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 .

³⁶ Questões extraídas de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

11) 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, D1 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.

12) Suponha que, ainda em regime monofotônico, um detector de fótons de não-demolição, D0, fosse colocado entre E1 e S2 (caminho A). Pode-se afirmar que, após algumas horas, D1 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, o espelho semi-refletor S2 fosse retirado do experimento. Pode-se afirmar que, na ausência de D0, após algumas horas, D1 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) Se no arranjo experimental descrito no enunciado (ausência de D0 e presença de S2) a fonte emitisse um único fóton, pode-se afirmar que

- a) o fóton seria detectado com certeza em D1.
- b) o fóton seria detectado com certeza em D2.
- c) a metade do fóton seria detectada em cada detector simultaneamente.
- d) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado em D1 ou em D2.
- e) o fóton não seria detectado em D1 nem em D2.

15) Suponha que um único fóton seja lançado para o interior do interferômetro, montado segundo o arranjo experimental descrito na questão anterior (questão 14). Se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado entre E1 e S2 (caminho A) num instante posterior à passagem do fóton por S1 e anterior à sua reflexão subsequente, pode-se afirmar que

- a) o fóton seria detectado com certeza em D1.
- b) o fóton seria detectado com certeza em D2.
- c) a metade do fóton seria detectada em cada detector simultaneamente.
- d) o fóton teria uma probabilidade de 50% de ser detectado em D1 ou em D2.
- e) o fóton não seria detectado em D1 nem em D2.

16) Na sua opinião, o fóton possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

17) Na sua opinião, o elétron possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

18) Você conhece ou já ouviu falar sobre as interpretações da mecânica quântica? Se sim, descreva o seu conhecimento sobre elas.

Solicitamos por gentileza que forneça seu e-mail e seu Whatsapp, para que possamos entrar em contato durante as etapas da pesquisa:

APÊNDICE D – TESTE I: IES “B”



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

Nome:
Nome fictício (preenchido pelo pesquisador):
Curso:
Semestre atual:
Data:

INSTRUMENTO PARA PRODUÇÃO DE DADOS: TESTE I

Caro Aluno,

Solicito sua colaboração, respondendo às questões formuladas a seguir. Este pré-teste tem por objetivo verificar se você possui conhecimentos prévios sobre alguns conteúdos de Física Moderna.

Este diagnóstico **NÃO ESTÁ** vinculado à disciplina e **NÃO** influirá nas avaliações feitas pelo professor. Agradecemos a você, por tornar esta coleta possível. Trata-se de uma pesquisa, não de uma avaliação discente.

1) Você já cursou ou está cursando alguma disciplina que envolva conteúdos da Teoria Quântica? Em caso positivo, qual?

1.1) Em caso de resposta positiva na questão anterior, você:

- (A) Atingiu a média suficiente para ser aprovado
- (B) Não atingiu média suficiente para se aprovado
- (C) Não atingiu frequência mínima nas aulas para ser aprovado
- (D) Você desistiu da disciplina antes do término do semestre
- (E) Outros. Qual?

1.3) Atualmente você está lecionando? Em caso positivo, escreva quais disciplinas e nível de ensino.

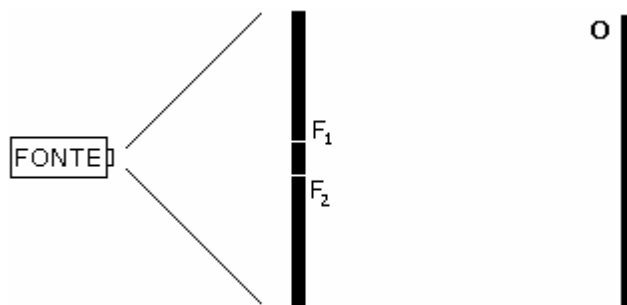
2) Existe alguma diferença entre um objeto microscópico e um macroscópico? Por exemplo, entre um elétron e um grão de areia. Explique sua resposta.

3) Explique, como se você estivesse explicando para um colega, o que é interferência. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

4) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um elétron. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

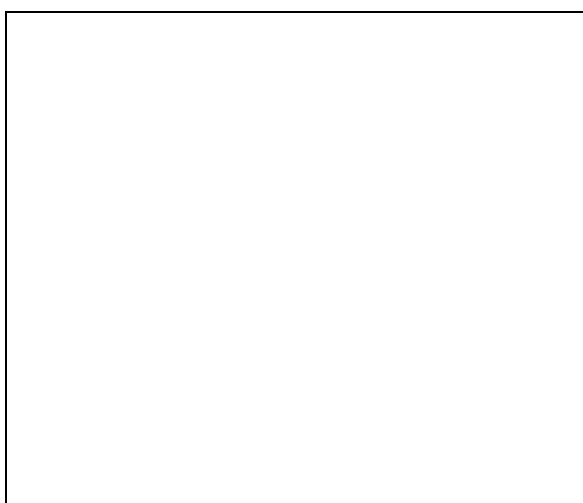
5) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um fóton. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

6) 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 atravessa o primeiro anteparo contendo as 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.

Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O , visto de frente. Após a fonte ser ligada.

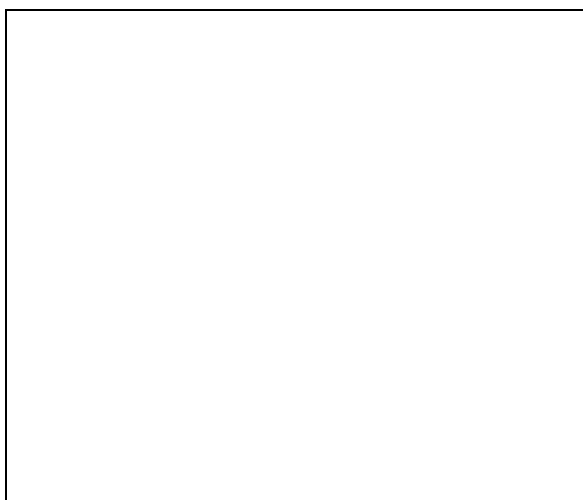


Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

7) Ainda observando o experimento apresentado na questão anterior: Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton por segundo fosse emitido de cada vez, e deixássemos o dispositivo ligado por 4 a 5 horas, qual seria a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo?

Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

8) Supondo ainda o mesmo regime monofotônico, qual imagem, vista de frente, observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado em F1?

Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.

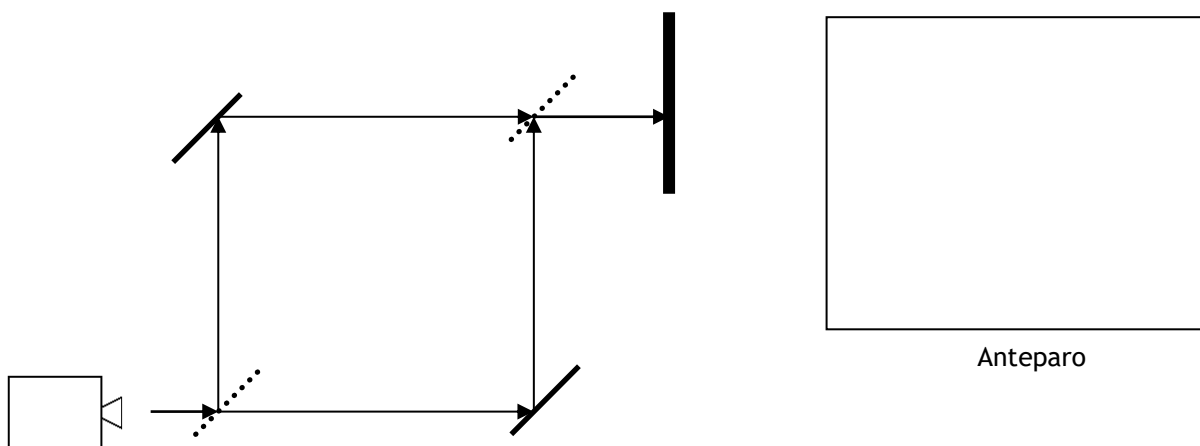


Anteparo O (Visão frontal)

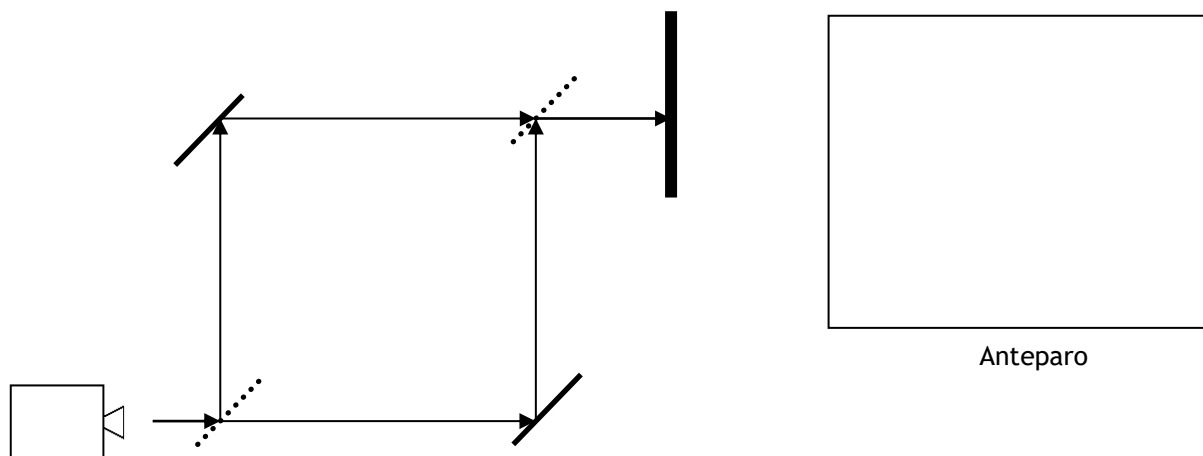
Por que você optou por desenhar esta imagem?

9) No esquema simplificado abaixo se encontra um espelho semi refletor que divide um feixe de fótons emitido pela fonte em dois. Após outro conjunto de espelhos, os feixes são novamente unidos.

O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir um feixe de luz (laser)? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.

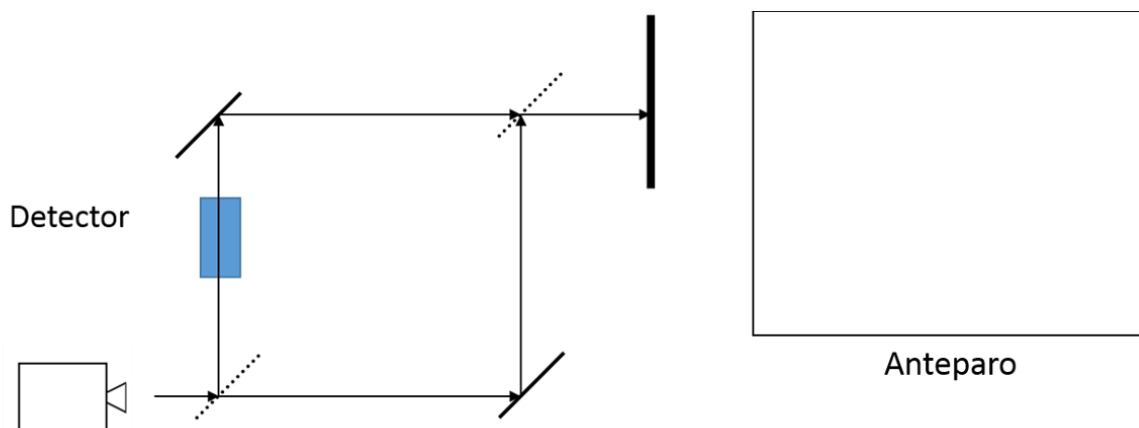


10) Levando em consideração o mesmo esquema simplificado. O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.

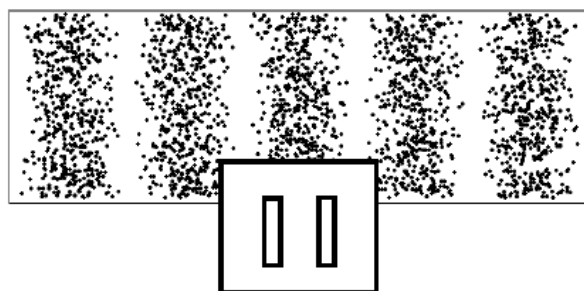


11) Agora, acrescentamos, um detector de fótons no arranjo experimental (como ilustrado na figura abaixo) nos informando a trajetória seguida pelo fóton.

O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



12)³⁷ Você atira um feixe de fótons em uma tela através de um par de fendas. O feixe é tão fraco que os fótons chegam um por vez na tela, mas eventualmente eles constroem um padrão de interferência, como mostrado na figura a direita. O que você pode dizer sobre qual fenda qualquer fóton individual passou?



a) Cada fóton passou ou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos determinar qual, sem mudar o padrão de interferência.

³⁷ Questão extraída de MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 6, n. 020121, p. 1-17, 2010.

- b) Cada fóton passou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita, mas é fundamentalmente impossível determinar qual.
- c) Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton em ambos os locais ao mesmo tempo.
- d) Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton passando por uma ou por outra fenda, mas isso destruiria o padrão de interferência.
- e) É impossível determinar se o fóton passou por uma fenda ou em ambas.

13) Na sua opinião, o fóton possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

14) Na sua opinião, o elétron possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

15) Você conhece ou já ouviu falar sobre as interpretações da mecânica quântica? Se sim, descreva o seu conhecimento sobre elas.

Solicitamos por gentileza que forneça seu e-mail e seu whatsapp, para que possamos entrar em contato durante as etapas da pesquisa:

APÊNDICE E – TESTE II

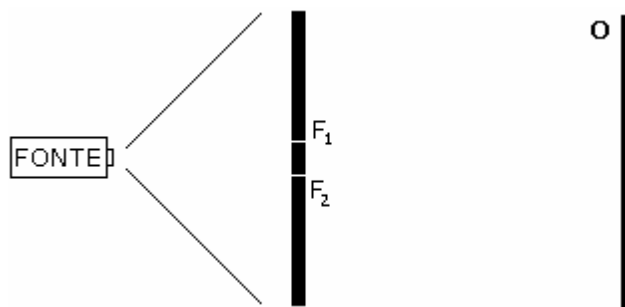


UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

Nome:
Nome fictício (preenchido pelo pesquisador):
Curso:
Semestre atual:
Data:

INSTRUMENTO PARA PRODUÇÃO DE DADOS: TESTE II

1 - 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 atravessa o primeiro anteparo contendo as 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.

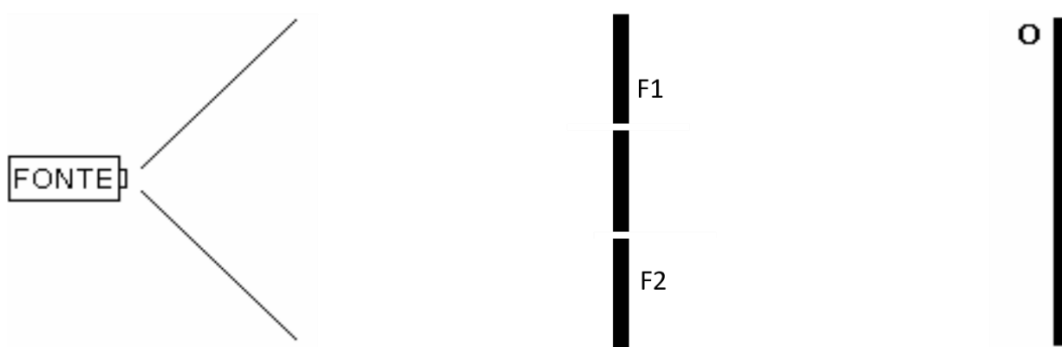
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O , visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do feixe de luz, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



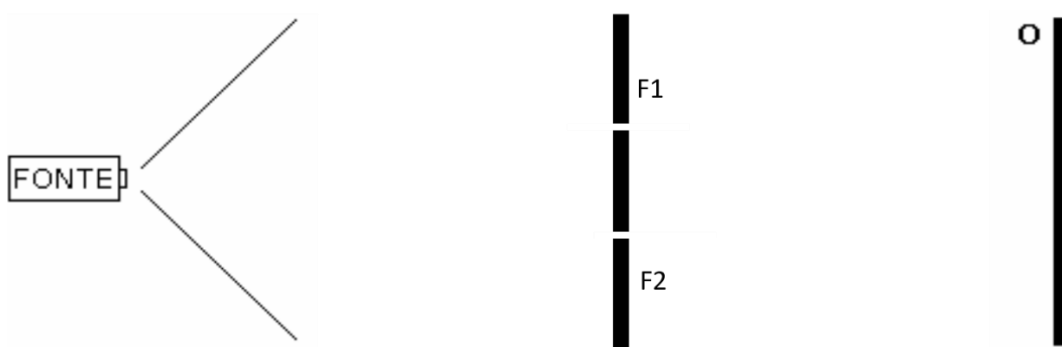
2 - Ainda observando o experimento apresentado na questão anterior: Se a fonte no experimento fosse tão precisa que apenas um elétron fosse emitido de cada vez, e deixássemos o dispositivo ligado por 4 a 5 horas, qual seria a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo? Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do elétron, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



3 - Supondo ainda o mesmo regime monoelétrônico, qual imagem, vista de frente, observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado em F1?

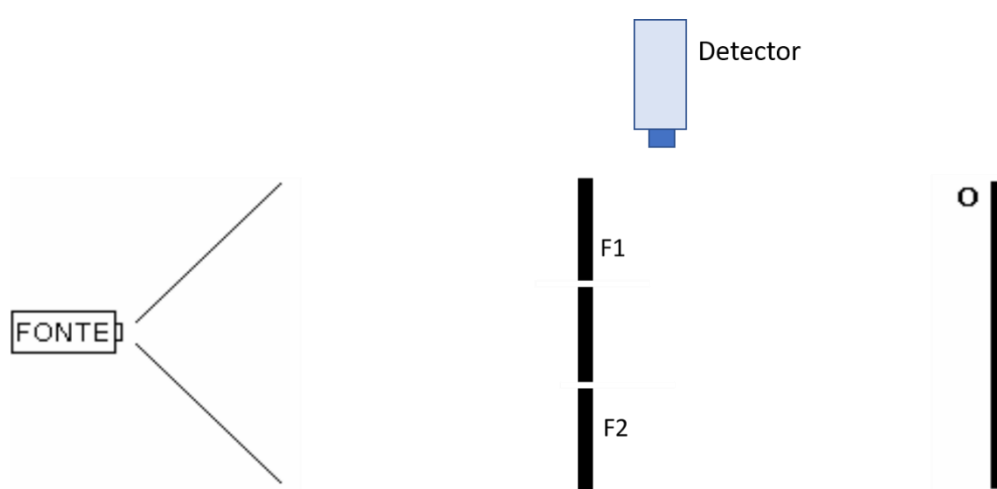
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

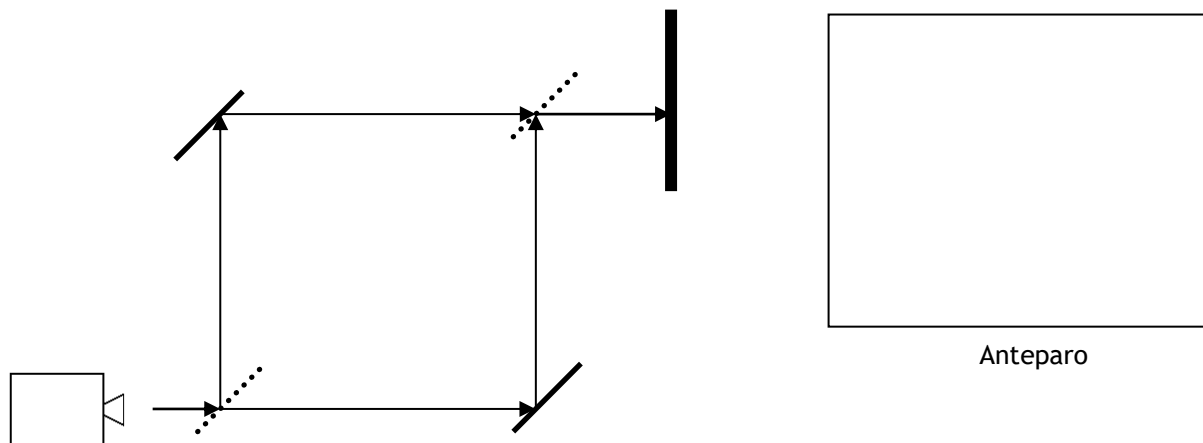
Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do elétron, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.

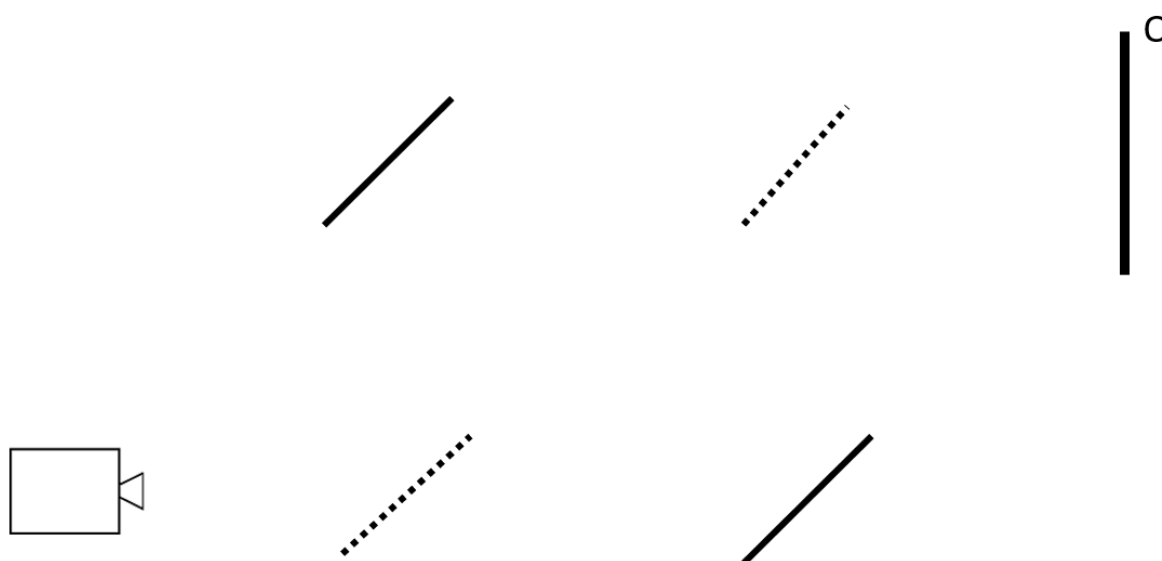


4 - No esquema simplificado abaixo se encontra um espelho semi refletor que divide um feixe de fótons emitido pela fonte em dois. Após outro conjunto de espelhos, os feixes são novamente unidos.

O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir um feixe de luz (laser)? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.

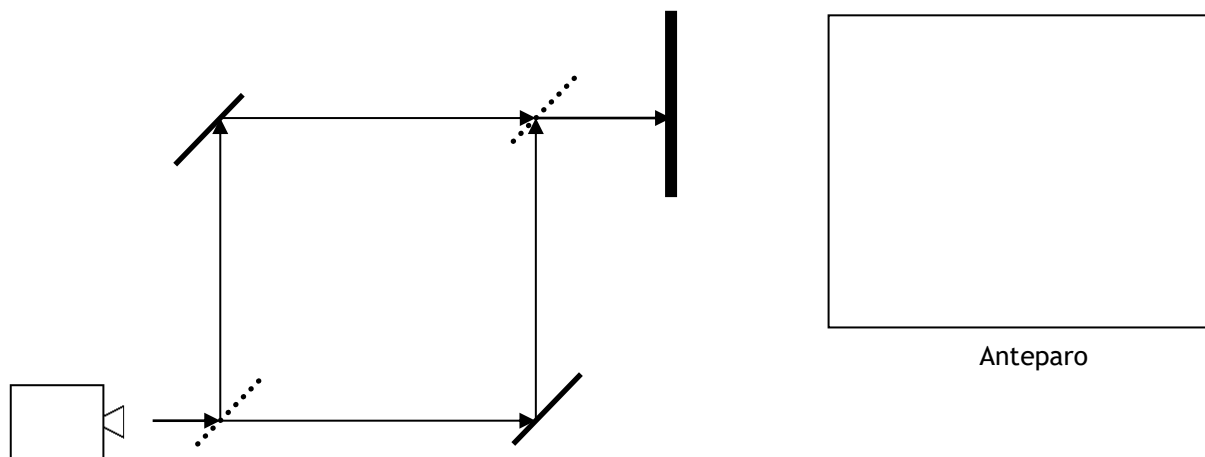


Desenhe no esquema abaixo a trajetória do feixe de luz, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.

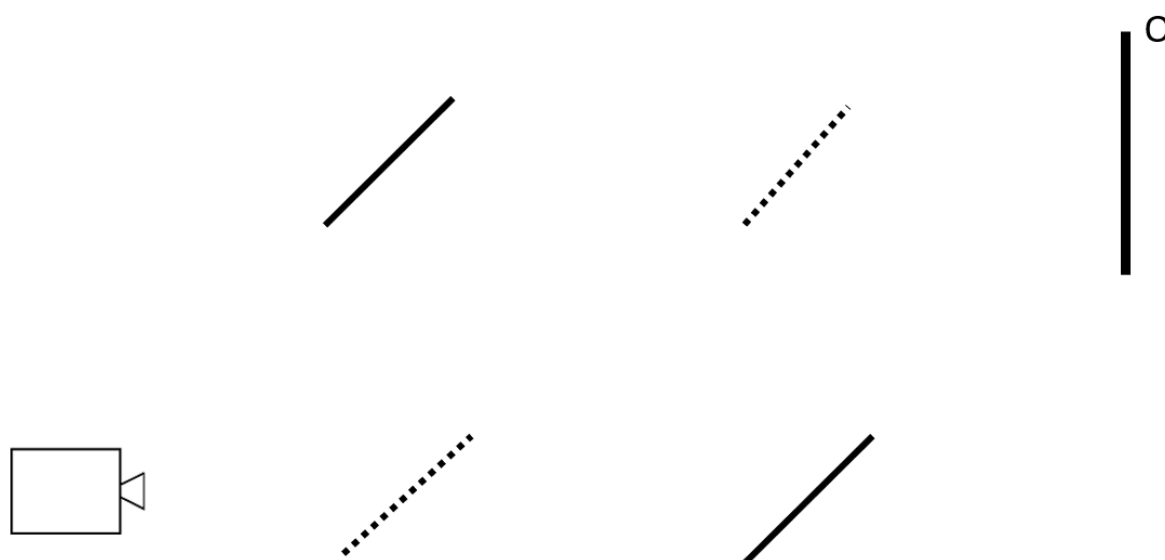


5 - Levando em consideração o mesmo esquema simplificado. O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe

no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.

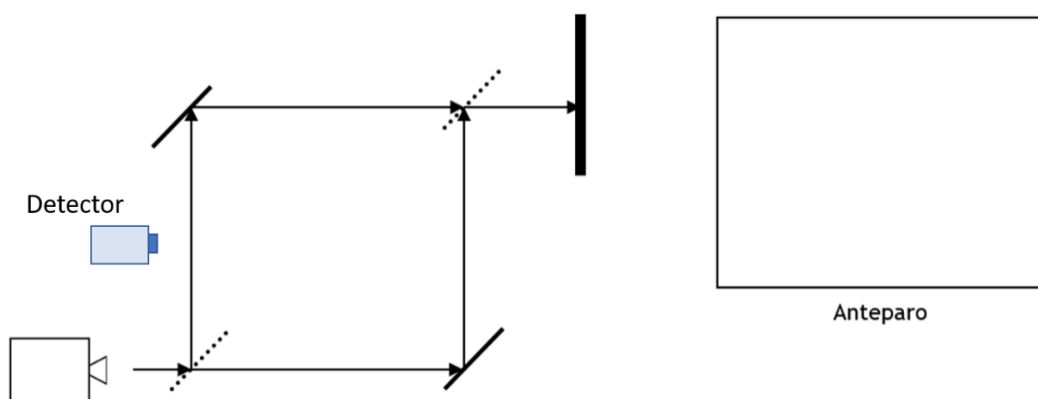


Desenhe no esquema abaixo a trajetória do fóton, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.

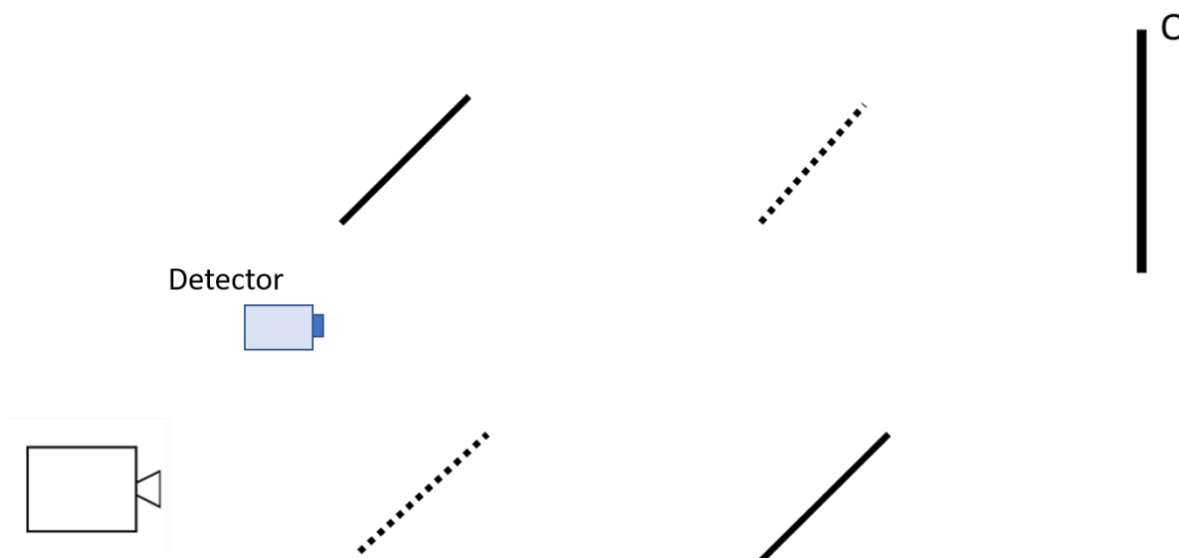


6 - Agora, acrescentamos, um detector de fótons no arranjo experimental (como ilustrado na figura abaixo) nos informando a trajetória seguida pelo fóton.

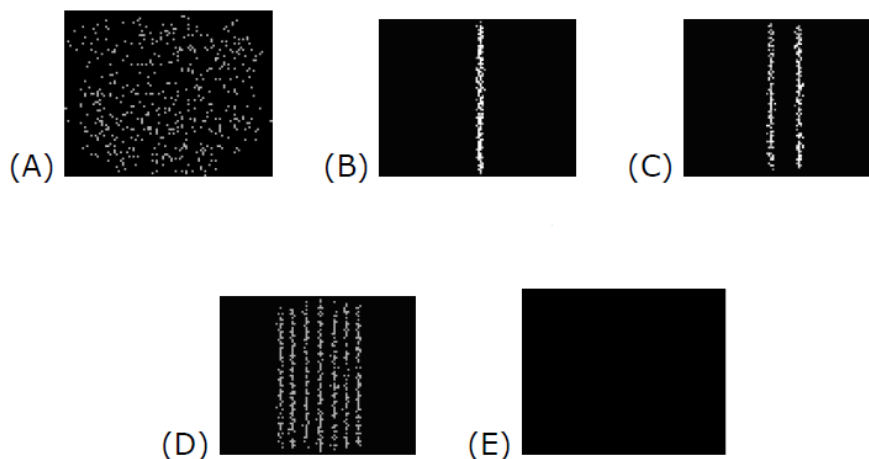
O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



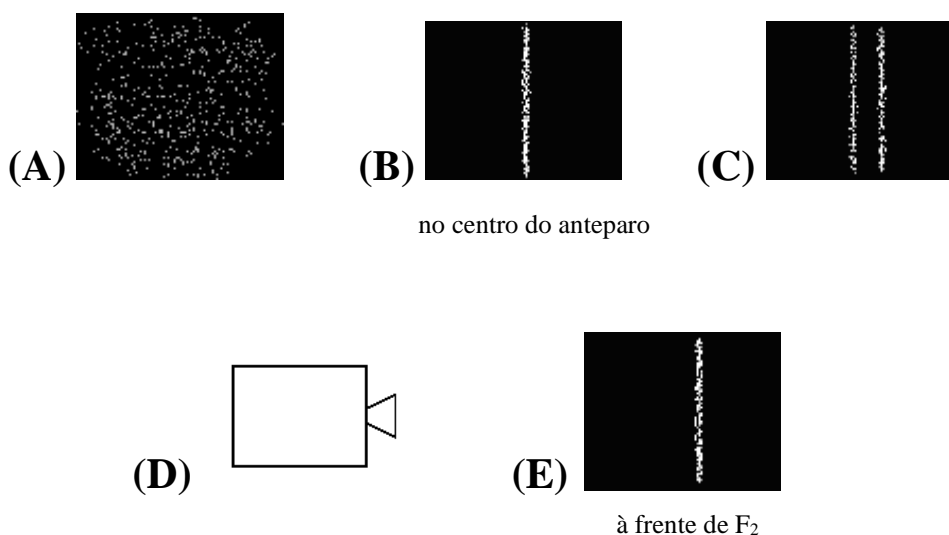
Desenhe no esquema abaixo a trajetória do fóton, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



7³⁸ - Ainda observando o experimento apresentado na questão anterior: Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton por segundo fosse emitido de cada vez, e deixássemos o dispositivo ligado por 4 a 5 horas, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo?



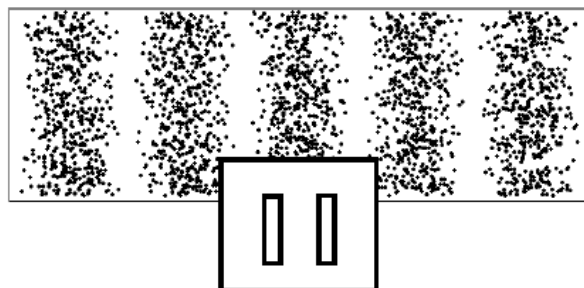
8³⁹ - Supondo ainda o mesmo regime monofotônico, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado em F1?



³⁸ Questão extraída de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

³⁹ Questão extraída de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

9⁴⁰ - Você atira um feixe de fótons em uma tela através de um par de fendas. O feixe é tão fraco que os fótons chegam um por vez na tela, mas eventualmente eles constroem um padrão de interferência, como mostrado na figura a direita. O que você pode dizer sobre qual fenda qualquer fóton individual passou?



- Cada fóton passou ou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos determinar qual, sem mudar o padrão de interferência.
- Cada fóton passou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita, mas é fundamentalmente impossível determinar qual.
- Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton em ambos os locais ao mesmo tempo.
- Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton passando por uma ou por outra fenda, mas isso destruiria o padrão de interferência.
- É impossível determinar se o fóton passou por uma fenda ou em ambas.

10 - Na sua opinião, o fóton possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

⁴⁰ Questão extraída de MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 6, n. 020121, p. 1-17, 2010.

11 - Na sua opinião, o elétron possui comportamento corpuscular e/ou ondulatório? É uma onda ou uma partícula? Explique sua resposta como se a estivesse defendendo, a ponto de ser aceita como uma teoria pela sociedade científica. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, fórmulas, figuras, etc.

APÊNDICE F – TESTE III

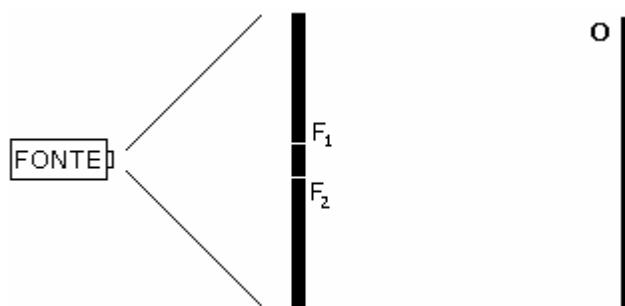


UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E
MATEMÁTICA

Nome:
Nome fictício (preenchido pelo pesquisador):
Curso:
Semestre atual:
Data:

INSTRUMENTO PARA PRODUÇÃO DE DADOS: TESTE III

1 - 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 atravessa o primeiro anteparo contendo as 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.

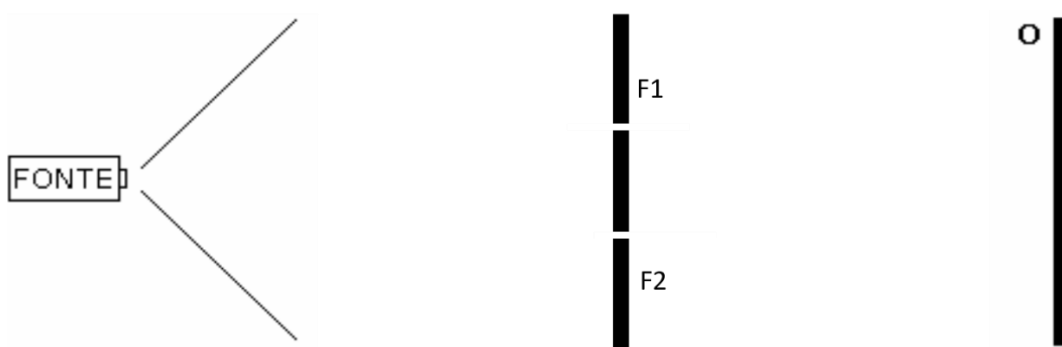
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O , visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do feixe de luz, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



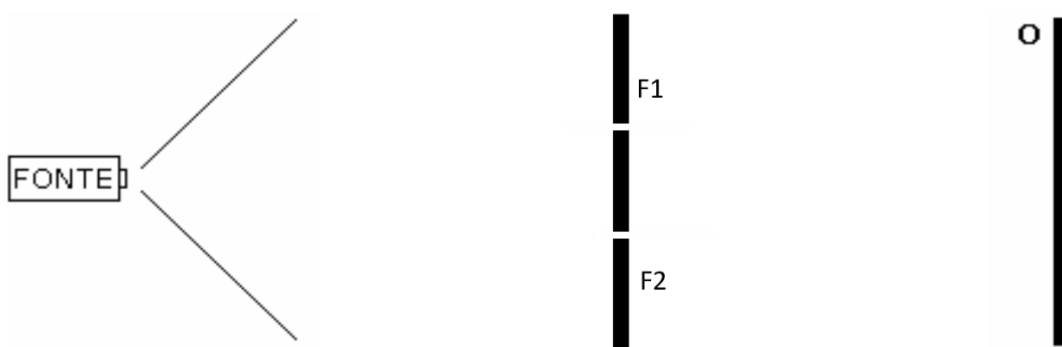
2 - Ainda observando o experimento apresentado na questão anterior: Se a fonte no experimento fosse tão precisa que apenas um elétron fosse emitido de cada vez, e deixássemos o dispositivo ligado por 4 a 5 horas, qual seria a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo? Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do elétron, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



3 - Supondo ainda o mesmo regime monoelétrônico, qual imagem, vista de frente, observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado em F1?

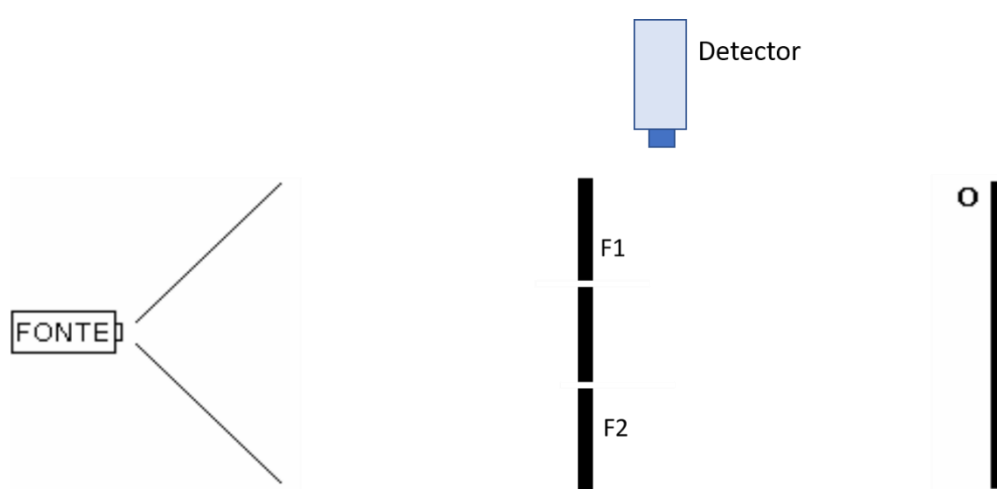
Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



Anteparo O (Visão frontal)

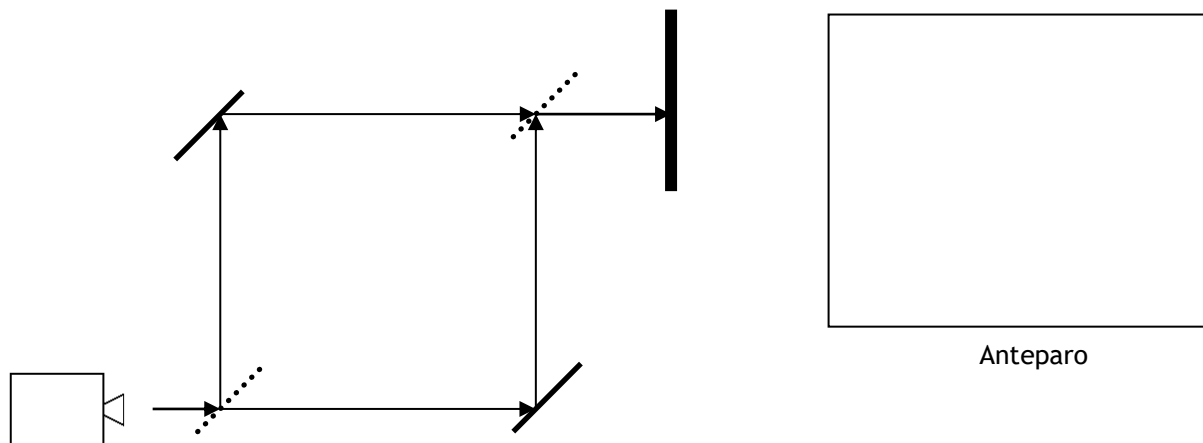
Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do elétron, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.

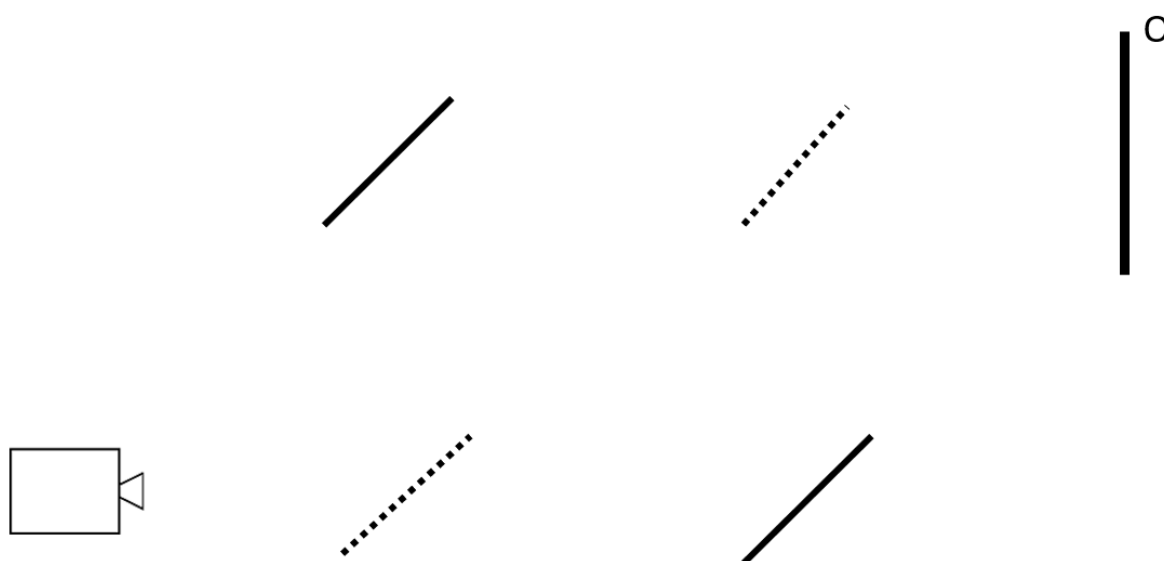


4 - No esquema simplificado abaixo se encontra um espelho semi refletor que divide um feixe de fótons emitido pela fonte em dois. Após outro conjunto de espelhos, os feixes são novamente unidos.

O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir um feixe de luz (laser)? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.

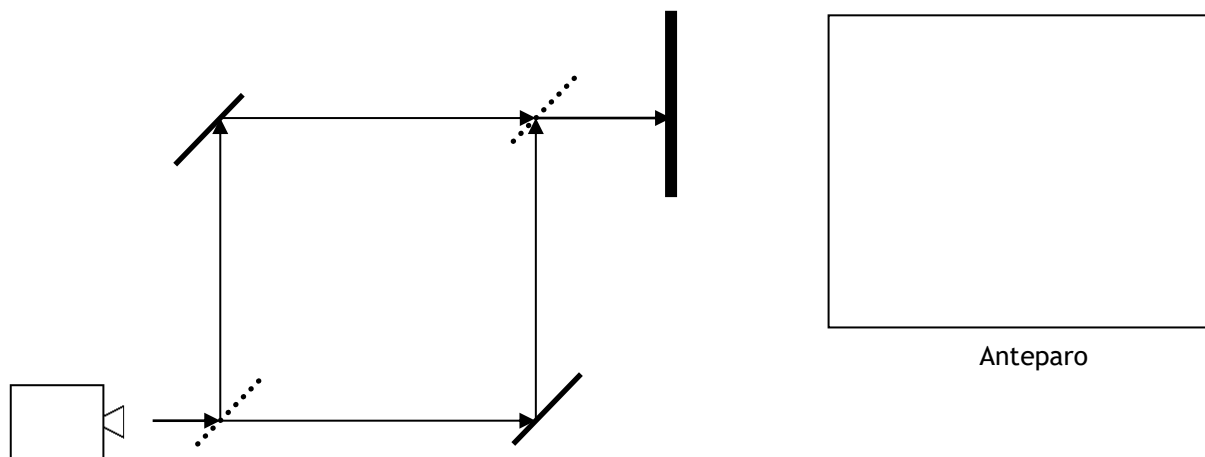


Desenhe no esquema abaixo a trajetória do feixe de luz, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.

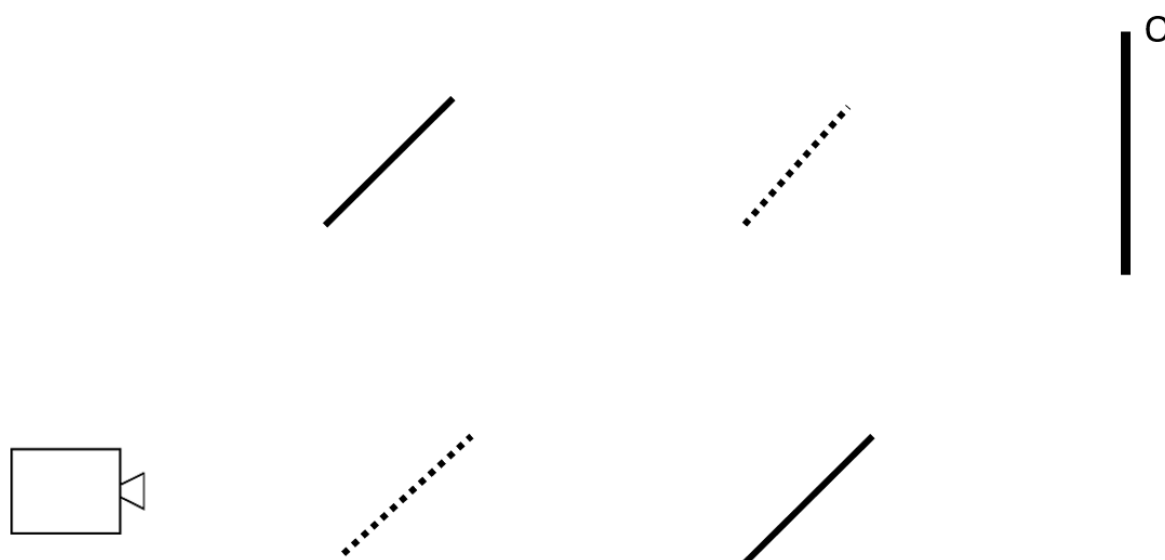


5 - Levando em consideração o mesmo esquema simplificado. O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe

no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.

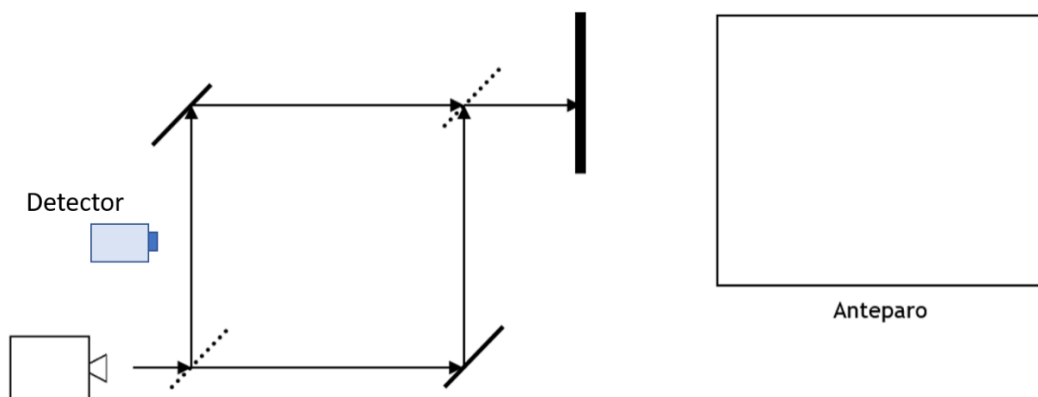


Desenhe no esquema abaixo a trajetória do fóton, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.

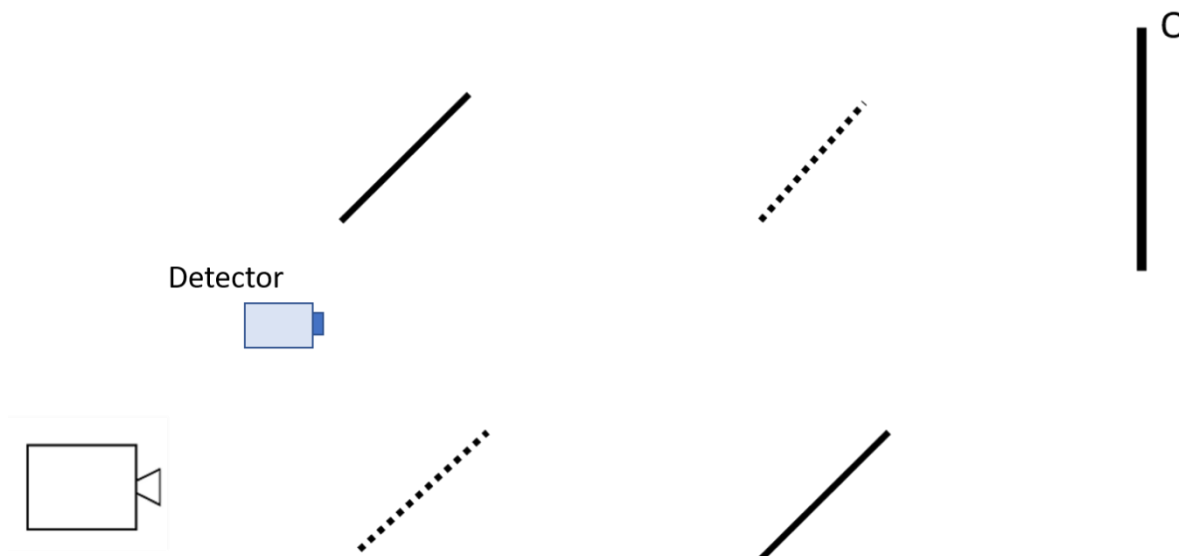


6 - Agora, acrescentamos, um detector de fótons no arranjo experimental (como ilustrado na figura abaixo) nos informando a trajetória seguida pelo fóton.

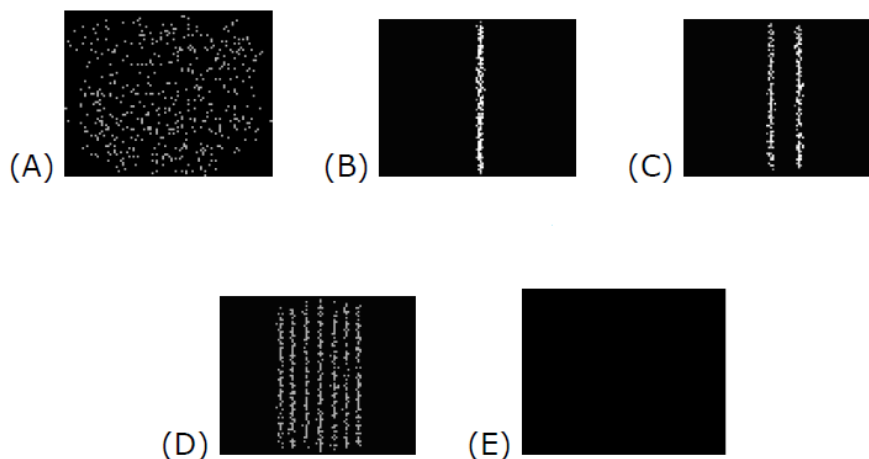
O que acontece no anteparo colocado após esta união, se a fonte for regulada para emitir apenas um fóton por vez? Desenhe no diagrama o que você acha que acontece (após a fonte ficar ligada por algumas horas). Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



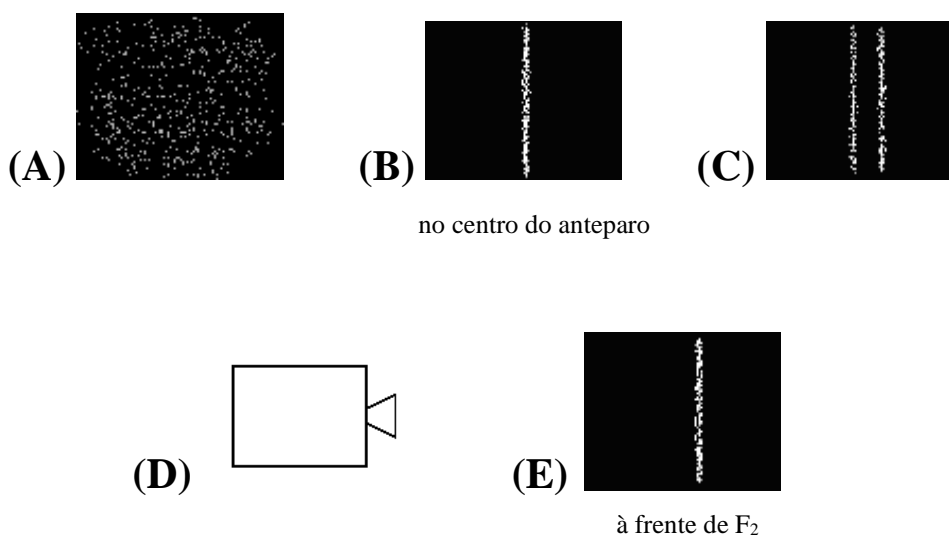
Desenhe no esquema abaixo a trajetória do fóton, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



7⁴¹ - Ainda observando o experimento apresentado na questão anterior: Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton por segundo fosse emitido de cada vez, e deixássemos o dispositivo ligado por 4 a 5 horas, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo?



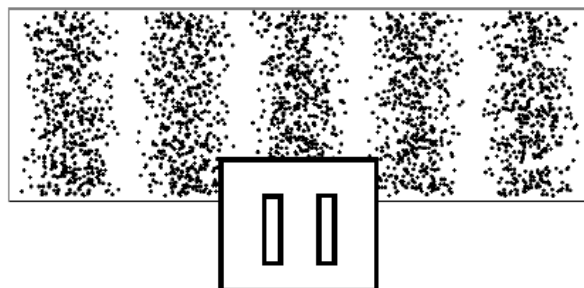
8⁴² - Supondo ainda o mesmo regime monofotônico, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo, após algumas horas, se um detector de fótons de não-demolição fosse colocado em F1?



⁴¹ Questão extraída de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

⁴² Questão extraída de PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vigo, v. 8, n. 1, p. 72-92, 2009.

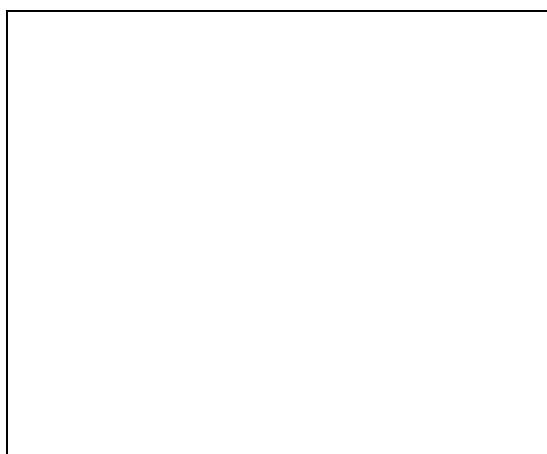
9⁴³ - Você atira um feixe de fótons em uma tela através de um par de fendas. O feixe é tão fraco que os fótons chegam um por vez na tela, mas eventualmente eles constroem um padrão de interferência, como mostrado na figura a direita. O que você pode dizer sobre qual fenda qualquer fóton individual passou?



- Cada fóton passou ou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos determinar qual, sem mudar o padrão de interferência.
- Cada fóton passou pela fenda da esquerda ou pela fenda da direita, mas é fundamentalmente impossível determinar qual.
- Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton em ambos os locais ao mesmo tempo.
- Cada fóton passou por ambas as fendas. Se tivéssemos um detector bom o suficiente, poderíamos medir um fóton passando por uma ou por outra fenda, mas isso destruiria o padrão de interferência.
- É impossível determinar se o fóton passou por uma fenda ou em ambas.

10⁴⁴ – Considere a montagem experimental da dupla fenda – com escolha demorada/retardada - com a fonte em regime quântico (emissão de elétrons individuais).

Desenhe a imagem que melhor representa o anteparo O, visto de frente. Após a fonte ser ligada.



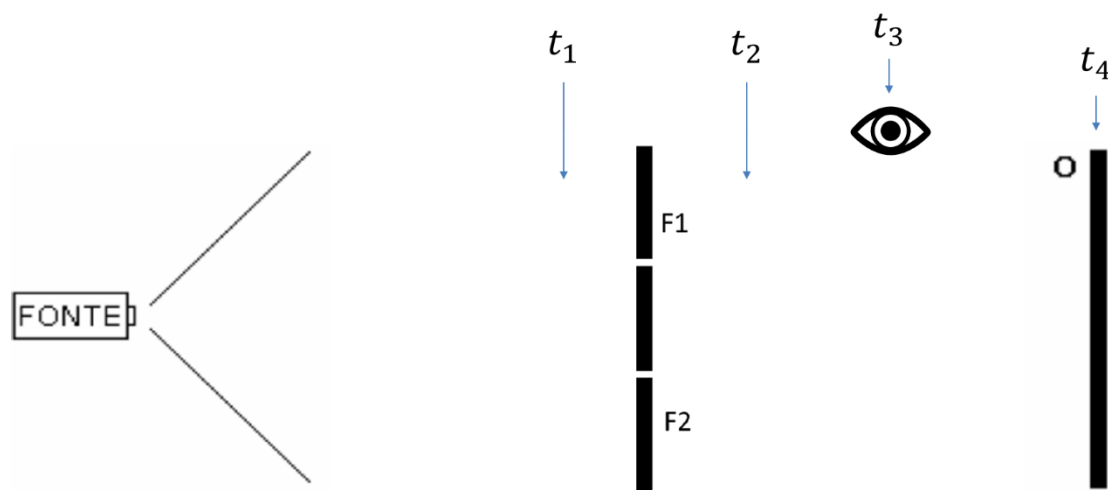
Anteparo O (Visão frontal)

⁴³ Questão extraída de MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. **Physical Review Special Topics-Physics Education Research**, v. 6, n. 020121, p. 1-17, 2010.

⁴⁴ Esta questão não fez parte do Teste III aplicado ao grupo de licenciandos da IES “A”.

Por que você optou por desenhar esta imagem?

Desenhe no esquema abaixo a trajetória do elétron, desde a sua emissão pela fonte, até o anteparo O de observação.



11 - Descreva, como se estivesse explicando a um colega seu, o que é um objeto quântico (elétron/fóton)? Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

12 - Na sua opinião, o raciocínio/conjunto de ideias que você utilizou para resolver e compreender os problemas propostos pelo aparato experimental da Dupla Fenda e do Interferômetro de Mach-Zehnder, está mais próximo a qual interpretação da Mecânica Quântica? Considerando as quatro principais que foram estudadas: Corpuscular (Realista), Ondulatória (Realista), Dualista (Realista), Dualista (Positivista). Justifique sua resposta.