

**UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL**

**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE  
CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**



**ROBSON TREVISAN**

**UM ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE AS IMAGENS MENTAIS  
UTILIZADAS POR ESTUDANTES DE MECÂNICA QUÂNTICA E SEU  
PERFIL EPISTEMOLÓGICO: uma investigação pela metodologia *Report  
Aloud***

Canoas, 2016

**UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL**

**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE  
CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**



**ROBSON TREVISAN**

**UM ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE AS IMAGENS MENTAIS  
UTILIZADAS POR ESTUDANTES DE MECÂNICA QUÂNTICA E SEU  
PERFIL EPISTEMOLÓGICO: uma investigação pela metodologia *Report  
Aloud***

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Luterana do Brasil para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Matemática.

Orientador: Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto

Canoas, 2016

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

T814e Trevisan, Robson

Um estudo da relação entre as imagens mentais utilizadas por estudantes de mecânica quântica e seu perfil epistemológico: uma investigação pela metodologia *Report Aloud*. / Robson Trevisan. – Canoas, 2016.

169 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Luterana do Brasil, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto

1. Educação – física. 2. Mecânica quântica. 3. Estudante – perfil epistemológico. 4. Teoria da mediação cognitiva. 5. Bancadas virtuais. 5. Processamento extracerebral. I. Andrade Neto, Agostinho Serrano. II. Título.

CDU 514.84

Bibliotecária Responsável: Ana Lígia Trindade CRB/10-1235

ROBSON TREVISAN

UM ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE AS IMAGENS MENTAIS  
UTILIZADAS POR ESTUDANTES DE MECÂNICA QUÂNTICA E SEU  
PERFIL EPISTEMOLÓGICO: uma investigação pela metodologia *Report  
Aloud*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Ensino de Ciências e  
Matemática da Universidade Luterana do  
Brasil para obtenção do título de Mestre em  
Ensino de Ciências e Matemática.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto (orientador)

---

Prof. Dr. Bruno Geraldo Carneiro da Cunha

---

Prof. Dr. Jeferson Fernando de Souza Wolff

---

Prof. Dr. Renato Pires dos Santos

Canoas, 12 de Abril de 2016.

À minha família, que com muito carinho e apoio,  
não mediram esforços para que eu chegasse até  
esta etapa de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por mais esta conquista.

À 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 Dr. Bruno Geraldo Carneiro da Cunha, Dr. Jeferson Fernando de Souza Wolff, e Dr. Renato Pires dos Santos, pelas contribuições dadas na ocasião da qualificação.

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 nestes espaços ao longo desta experiência.

Aos amigos, pelo apoio e carinho nos momentos de dificuldade.

Aos colegas do grupo de pesquisa, pelas discussões e auxílios em todos os momentos.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós Graduação Em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIM) - ULBRA que contribuíram para a minha formação.

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.

## RESUMO

A presente dissertação busca investigar a relação entre o perfil epistemológico do estudante, suas imagens mentais e *drivers* construídos após a utilização de ferramentas hiperculturais sob a forma de bancadas virtuais. Para tanto, escolheu-se como conteúdo de conhecimento o comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética, tópico fundamental da Mecânica Quântica (MQ), dentro do currículo de estudantes de licenciatura em física. A condução da investigação converge e culmina na tentativa de relacionar as imagens mentais e *drivers* dos alunos com as principais interpretações da MQ, a ponto de mapear as filosofias com maior destaque e influência no espírito do sujeito na construção de conhecimentos acerca da dualidade. Os sujeitos investigados nesta pesquisa cursavam o sétimo período do curso de Licenciatura em Física. O referencial teórico adotado para leitura dos dados foi a Teoria da Mediação Cognitiva (TMC), procurando explicar como a mediação pelo uso computador modifica a estrutura cognitiva dos estudantes. Utilizou-se, também, a ideia de perfil epistemológico Bachelardiano para relacioná-la com a postura epistemológica expressada pelos alunos. Os resultados foram obtidos após as análises realizadas sobre os pré-testes, pós-testes e gestos descritivos obtidos das imagens de vídeo, gravadas durante as entrevistas do pós-teste, sendo que essas entrevistas foram conduzidas seguindo o método “*Report Aloud*”, uma adaptação do protocolo “*Think Aloud*”. 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, verificou-se que os *softwares* não se mostraram eficazes para uma nova aquisição de *drivers* microscópicos. Para compreender o porquê, levanta-se a hipótese de que os *softwares* utilizados não apresentam representações gráficas dos objetos quânticos utilizados (fóton ou elétron) e, portanto, não oferecem como mecanismo de processamento externo auxiliar à cognição, uma forma do estudante gerar imagens mentais.

**Palavras-chave:** Bancadas Virtuais; Mecânica Quântica; Teoria da Mediação Cognitiva; Perfil Epistemológico; Processamento Extracerebral.

## ABSTRACT

This dissertation investigates the relationship between the epistemological student profile, his mental images and drivers built after using hipercultural tools in the form of virtual stands. Therefore, it was chosen as content of knowledge the dual behavior of matter and electromagnetic radiation, fundamental topic of Quantum Mechanics (QM) within the undergraduate students curriculum in Physics. The conduction of the research focuses and culminates in an attempt to relate the mental images and drivers of the students with the main interpretations of QM to map the philosophies with more prominence and influence in the spirit of the subject in the construction of knowledge about duality. The individuals investigated in this study were enrolled in the seventh period of the Bachelor's Degree in Physics. The theoretical framework adopted for reading the data was the Theory of Cognitive Mediation (TMC), seeking to explain how computer mediation use modifies the cognitive structure of students. It also used the idea of epistemological Bachelardian profile to relate it to the epistemological stance expressed by the students. The results were obtained after the analysis performed on the pre-test, post-test and descriptive gestures obtained by video images, recorded during the post-test interviews, and those interviews were conducted following the "Report Aloud," an adaptation of the protocol "Think Aloud". The epistemological profile of students was drawn according to private interpretation, inferred from the expressed and identified conceptual drivers, and also compared with the four main interpretations of TQ. Despite this positive result, it was found that the softwares were not effective for a new acquisition of microscopic drivers. In order to understand why, it is raised the hypothesis that the software used do not show graphical representations of the quantum objects used (photon or electron), and therefore does not offer, as an external processing device used to aid cognition, a way for the student to generate mental images..

**Key words:** Virtual Countertops; Quantum Mechanics; Theory of Cognitive Mediation; Epistemological profile; Extracerebral Processing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processamento cognitivo por mediação externa.....	31
Figura 2 - Exemplo de interação indireta entre dois sujeitos via mediação social.....	35
Figura 3 - Processamento externo via mediação cultural.....	37
Figura 4 - Mapa conceitual da TMC.....	44
Figura 5 - Perfil epistemológico da noção pessoal de massa. ....	48
Figura 6 - Perfil epistemológico da noção pessoal de energia. ....	50
Figura 7 - As visões filosóficas e suas noções acerca da dualidade. ....	53
Figura 8 - Arranjo experimental da dupla fenda.....	72
Figura 9 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com projéteis.....	74
Figura 10 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com ondas de luz. ....	75
Figura 11 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com elétrons.....	77
Figura 12 - Interferômetro de Mach-Zehnder.....	78
Figura 13 - IMZ em regime clássico, na perspectiva de $40^\circ$ . Há formação do padrão de interferência no anteparo. ....	79
Figura 14 - IMZ em regime monofotônico. Há formação do padrão de interferência no anteparo. ....	81
Figura 15 - IMZ em regime monofotônico com um detector no caminho A. Não há formação de padrão de interferência no anteparo.....	83
Figura 16 - Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder. ....	97
Figura 17 - Arranjo experimental virtual da Fenda Dupla de Young.....	98
Figura 18 - (I) A1 utilizando as mãos para simular a trajetória do fóton, que dividido toma o caminho da direita e da esquerda, (II) Mãos apontando para o mesmo ponto, simulando o encontro das partes (ondas) do fóton.....	105
Figura 19 - Trajetórias possíveis para o feixe de luz e fótons. ....	106
Figura 21 - Desenho realizado na etapa “previsão” do roteiro de atividades. (II) Desenho realizado na etapa “observação” do roteiro de atividades. ....	107
Figura 20 - A1 utilizando as mãos para representar uma esfera.....	107
Figura 22 - (I) Aluno com as duas mãos paralelas representando bolas de gude incidindo nas duas fendas, (II) Duas mãos paralelas, mas distantes uma da outra, representando as bolas de gude após passarem pelas fendas, (III) Mãos paralelas representando o local em que as bolas de gude tocam o anteparo de observação. ....	108
Figura 23 - Perfil epistemológico do A1 acerca da noção pessoal da dualidade.....	110
Figura 24 - (I) Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste. (II) Imagem fornecida pelo <i>software</i> ao longo da simulação.....	112
Figura 25 - (I) Imagem desenhada pelo aluno no pré-teste. (II) Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste. ....	113
Figura 26 - (I) As duas mãos representam frentes de onda, (II) Polegar e indicador de ambas as mãos no formato de duas semicircunferências, representando um vale e uma crista de onda. ....	114

Figura 27 - (I) Ambas as mãos representando uma esfera, (II) Indicador da mão direita em movimento oscilatório, representando uma onda senoidal.....	115
Figura 28 - Perfil epistemológico do A2 acerca da noção pessoal da dualidade.....	116
Figura 29 - Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste.....	118
Figura 30 - A3 representando o formato de um fóton, por ele imaginado. ....	119
Figura 31 - Imagem que representa a alternativa C, escolhida como resposta.....	120
Figura 32 - Perfil epistemológico do A3 acerca da noção pessoal da dualidade.....	121
Figura 33 - Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste.....	122
Figura 34 - A4 utilizando as mãos para simular as possíveis trajetórias do fóton, após a iteração com o primeiro espelho semi-refletor. ....	123
Figura 35 - A4 utilizando o polegar e o indicador para representar o fóton.....	124
Figura 36 - A4 utilizando o polegar e o indicador para representar o fóton.....	125
Figura 37 - Perfil epistemológico do A4 acerca da noção pessoal da dualidade.....	127
Figura 38 - (I) Perfil epistemológico do A1. (II) Perfil epistemológico do A2. (III) Perfil epistemológico do A3. (IV) Perfil epistemológico do A4.....	129

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	16
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	17
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1 METODOLOGIA ADOTADA NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.2 PROPOSTAS DE ENSINO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA .....	20
2.3 LEVANTAMENTO DE CONCEPÇÕES E INTERPRETAÇÕES ACERCA DA DUALIDADE .....	23
<b>CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	26
3.1 A TEORIA DA MEDIAÇÃO COGNITIVA (TMC) .....	26
<b>3.1.1 A Era Digital e o Surgimento da Hipercultura</b> .....	26
<b>3.1.2 Fundamentos da TMC</b> .....	28
<b>3.1.3 Máquinas virtuais internas: os “drivers”</b> .....	32
<b>3.1.4 Formas de mediação</b> .....	34
<b>3.1.5 Suporte teórico da TMC</b> .....	39
<b>3.1.6 A TMC sintetizada em um mapa conceitual</b> .....	44
<b>3.1.6 Exemplos de utilizações da TMC no Ensino de Ciências</b> .....	44
3.2 A IDEIA DE PERFIL EPISTEMOLÓGICO BACHELARDIANO .....	47
<b>3.2.1 A relação entre as visões filosóficas e suas noções acerca da dualidade</b> .....	51
3.3 A NOÇÃO DE OBSTÁCULO EPISTEMOLÓGICO .....	54
3.4 A VISÃO DE IMAGENS MENTAIS ASSUMIDA .....	55
<b>CAPÍTULO 4 – A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA</b> .....	58
4.1 UMA REVISÃO DE INFORMAÇÕES DE CUNHO HISTÓRICO, FREQUENTEMENTE DISCUTIDAS EM SALA DE AULA, A RESPEITO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.....	58
4.2 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.....	64
<b>4.2.1 A dualidade nos dias de hoje</b> .....	66
4.3 UMA INTRODUÇÃO ÀS QUATRO INTERPRETAÇÕES DA TEORIA QUÂNTICA .....	67
4.4 O ARRANJO EXPERIMENTAL DA DUPLA FENDA .....	71
<b>4.4.1 A dupla fenda em regime clássico – experiências com projéteis e ondas</b> .....	72
<b>4.4.2 A dupla fenda em regime quântico – uma experiência com elétrons/fótons</b> .....	76
4.5 O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER .....	78
<b>4.5.1 O IMZ em regime clássico – interferência de ondas</b> .....	79

<b>4.5.2 O IMZ em regime quântico – interferência de um fóton</b> .....	80
<b>CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA</b> .....	84
5.1 BREVE TRAJETÓRIA DO AUTOR.....	84
5.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PESQUISA.....	85
<b>5.2.1 A opção pela Pesquisa Qualitativa (Interpretativa)</b> .....	85
5.3 SUJEITOS DA PESQUISA.....	89
5.4 PRODUÇÃO DE DADOS: OS INSTRUMENTOS DE COLETA .....	90
<b>5.4.1 O Pré-teste</b> .....	91
<b>5.4.2 O Pós-teste</b> .....	93
5.5 DELINEAMENTOS METODOLÓGICOS – O EXPERIMENTO .....	96
5.6 ANÁLISE DOS DADOS.....	99
<b>5.6.1 Análise textual discursiva</b> .....	99
<b>5.6.2 Análise gestual descritiva</b> .....	101
5.7 RESUMO DA METODOLOGIA EM FORMA DE DIAGRAMA .....	102
<b>CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS</b> .....	104
6.1 ANÁLISE .....	104
6.2 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A1” .....	105
<b>6.2.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A1</b> .....	109
6.3 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A2” .....	111
<b>6.3.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A2</b> .....	116
6.4 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A3” .....	118
<b>6.4.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A3</b> .....	121
6.5 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A4” .....	122
<b>6.5.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A4</b> .....	126
6.6 SÍNTESE DA ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	128
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	132
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	136
<b>APÊNDICES</b> .....	143
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PRÉ-TESTE .....	144
APÊNDICE B – GUIA DE ATIVIDADE.....	149
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE.....	165

## INTRODUÇÃO

O início do século XX marca uma nova etapa para a história da Física, o surgimento da Teoria Quântica, considerada responsável direta pelos grandes avanços tecnológicos ocorridos ao longo das últimas décadas, e que, junto com a Teoria da Relatividade de Einstein, “reescreveram” toda a física, do estado sólido à física das partículas elementares.

A Mecânica Quântica (MQ), também chamada de Física Quântica (FQ), ou, ainda, Teoria Quântica (TQ), formulada para explicar o comportamento do átomo, e que tomou bases rigorosamente científicas no período compreendido pelo final do século XIX e início do século XX, levando os cientistas a impasses em relação às teorias bem estabelecidas na época, baseados na Mecânica Clássica e na Teoria Eletromagnética, torna-se, hoje, o alicerce de sustentação da tecnologia em benefício do mundo macroscópico, podendo ser vista em diversas aplicações pontuais. Dentre elas, o dispositivo de produção de imagens por ressonância magnética (NMR), a tomografia por emissão de pósitrons (PET), o microscópio eletrônico de varredura por tunelamento, o relógio atômico do sistema de posicionamento global (GPS) e as próprias TIC, derivadas do transistor. Em suma, sua vasta gama de aplicações parece inesgotável.

A TQ é tida como uma teoria sólida e de sucesso, pois suas previsões têm sido comprovadas experimentalmente ao longo deste século com grande precisão. Mesmo diante desse cenário, “[...] é notável, no entanto, que a mecânica quântica 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).

Diante disso, pode-se destacar o tema da dualidade onda-partícula da matéria e da radiação eletromagnética. Esse tema proporcionou o surgimento de inúmeras interpretações para a ocorrência dos fenômenos observados, 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 FQ. Baseados nesses aspectos, trabalhos como os de Pessoa Jr (1997), Greca; Moreira; Herscovitz, (2001), Müller; Wiesner, (2002), Montenegro; Pessoa Jr, (2002), Ostermann; Prado, (2005), Ostermann et al. (2009) e Pereira; Ostermann; Cavalcanti (2009) foram realizados com diversos objetivos, dentre eles, o de apresentar aspectos conceituais fundamentais de MQ;

proporcionar cursos introdutórios de MQ, optando por explicações com ênfase conceitual; avaliar o aprendizado e as concepções dos estudantes acerca de tópicos de MQ; verificar as principais interpretações apresentadas por estudantes ao se depararem com o fenômeno da dualidade, buscando, também, sempre que possível, averiguar como estava ocorrendo didaticamente (metodologicamente) o ensino da MQ. Em comum, os trabalhos abordam o tema da dualidade onda-partícula, reforçando, portanto, a ideia expressa por Feynman, Leighton e Sands (2008) de que esse fenômeno é fundamental no estudo da MQ.

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, envolvendo-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.

O ensino da FQ pode proporcionar uma visão contemporânea da prática científica, na qual a ciência é encarada como construção humana e, portanto, inacabada, aberta e historicamente datada (OSTERMANN et al., 2009). Todos esses elementos tornam inadiável a necessidade de se propiciar aos profissionais das carreiras que mais utilizam esses recursos o conhecimento de fundamentos da MQ, não apenas de "regras" ou de algoritmos de resolução (GRECA, 2000).

Observando o panorama apresentado, este trabalho buscou utilizar ferramentas hiperculturais em forma de laboratórios (bancadas) virtuais como forma de mediação digital em atividades com alunos do curso de Licenciatura em Física, complementando as abordagens tradicionais de ensino na construção ou modificação de conhecimentos relacionados à dualidade onda-partícula. Assim, tendo o objetivo de, após tal intervenção hipercultural, verificar as interpretações dos alunos de acordo com as suas imagens mentais e *drivers* relacionados à MQ e, a partir delas, traçar um perfil epistemológico<sup>1</sup> privado, de acordo com a noção dos conceitos acerca dos fenômenos relacionados à dualidade onda-partícula, expressados individualmente pelos alunos. À vista disso, acredita-se que a contribuição principal dessa pesquisa seja justamente a interligação entre as imagens mentais

---

<sup>1</sup>Diversas escolas filosóficas e posturas epistemológicas tomadas pelo sujeito ao construir o conceito de determinado conteúdo. Sendo que, uma única conduta filosófica não seria suficiente para expressar as diferentes formas de pensar quando se tenta apresentar e explicar um simples conceito (BACHELARD, 1991).

e *drivers*, averiguados ao longo das atividades desempenhadas com os alunos, e o perfil epistemológico dos estudantes a respeito do comportamento da radiação eletromagnética e de objetos quânticos.

Nesta pesquisa, a investigação tem caráter qualitativo, sendo composta por quatro etapas: pré-teste, atividade com o *software* em forma de bancada virtual, pós-teste e entrevista do pós-teste. Os resultados foram obtidos após as análises realizadas sobre os pré-testes, pós-testes e imagens de vídeo obtidas durante as entrevistas do pós-teste. A apreciação do conteúdo dessas gravações foi realizada por meio da análise textual discursiva (MORAES; GALIAZZI, 2007) e análise gestual descritiva (MONAGHAN; CLEMENT, 1999). O referencial teórico adotado para leitura dos dados foi a Teoria da Mediação Cognitiva (TMC), buscando explicar como a mediação por computador – visto como um mecanismo de processamento extracerebral<sup>2</sup> – modifica a estrutura cognitiva dos estudantes, principalmente no que toca as suas representações internas e, de uma forma mais ampla, o conhecimento tácito que o estudante dispõe para interpretar o que está acontecendo fisicamente dentro dessas bancadas virtuais.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Nos cursos em que a MQ é apresentada, o ensino tradicional ainda se encontra enraizado, dando ênfase aos algoritmos de resoluções das equações matemáticas. De acordo com Greca, Moreira e Herscovitz (2001), as abordagens típicas desses cursos não criam condições para que os alunos aprendam uma nova forma de interpretar os fenômenos da MQ.

Montenegro e Pessoa Jr (2002) apontam em uma das conclusões de seu trabalho que o experimento da dupla fenda para elétrons individuais é o mais paradigmático e importante da MQ, e que, apesar disso, aproximadamente metade dos alunos responderam erroneamente as questões propostas que envolviam tal ponto. Esses resultados, segundo os autores, devem-se ao fato de os cursos de MQ serem excessivamente voltados para os cálculos, negligenciando os conceitos e as questões interpretativas.

Schuck e Serrano (2004) utilizam bancadas virtuais para o ensino de diversos conceitos da MQ na disciplina de Estrutura da matéria em um Curso de Química em nível superior e observam que os estudantes têm dificuldade em explicar o comportamento dual dos objetos quânticos, possivelmente, segundo os autores, devido à utilização da noção-partícula

---

<sup>2</sup> Processamento de informação realizado fora do cérebro, ocorrido através da mediação de mecanismos externos (objetos físicos, sistemas simbólicos etc.).

como obstáculo epistemológico. Esta dificuldade só é superada pela dificuldade ainda maior de explicar o comportamento dual de objetos quânticos virtuais.

Neste tocante, Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009) apresentam uma proposta com o intuito de melhorar os resultados em termos de conhecimento acerca do caráter dual da matéria e da radiação eletromagnética, utilizando um *software* livre, tipo bancada virtual, o qual simula o interferômetro de Mach-Zehnder, considerado pelos autores como uma releitura mais moderna do experimento de dupla fenda, provocando, naturalmente, reflexões sobre o problema conceitual do caminho percorrido pelo fóton.

A dificuldade para se trabalhar em um arranjo experimental de regime quântico justifica plenamente a utilização de um *software* no qual esse aparato possa ser simulado. Tendo em vista os avanços tecnológicos, cada vez mais as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) estão presentes no cotidiano das pessoas, tornando-se, também, ferramentas com grandes potencialidades na construção do conhecimento pelos alunos, quando empregadas adequadamente nos processos educativos.

Dessa forma, a tecnologia adquire rapidamente a importância do seu uso na educação. Diante desse contexto, Ross, Morrison e Lowther (2010) reforçam a inserção tecnológica no planejamento das aulas, os mesmos também sugerem que as futuras pesquisas preocupem-se em investigar aplicações diretas na aprendizagem, apresentando propostas preocupadas com todos os aspectos didáticos, práticas que possibilitarão a construção de novos conhecimentos.

Considerando o cenário arquitetado, justifica-se a utilização de *softwares* em forma de laboratórios virtuais, estabelecendo, assim, um ganho no processamento extracerebral de informações, permitindo que o aluno conecte-se ao ambiente virtual que será o mediador digital entre o 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 que a estimulação proporcionada pela interação aluno-simulador potencializa a sua propensão em entender os conceitos apresentados.

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 disseminando 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).

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Após a identificação da importância do tema da dualidade-onda partícula, no ensino da MQ, mantendo a preocupação na abordagem conceitual, e não apenas nos processos de cálculos matemáticos, e também a crescente aparição das TIC voltadas aos processos educativos, proporcionando a utilização de *softwares* que simulam experimentos em regime quântico, esta pesquisa toma como proposta de trabalho o estudo da forma de aprendizado quando se utiliza, por mediação, um mecanismo externo de processamento de informações – o computador. Diante disso, emerge a seguinte pergunta central de pesquisa:

*Qual a relação entre o perfil epistemológico do estudante, suas imagens mentais e drivers<sup>3</sup> modificados e/ou construídos após a utilização de experimentos virtuais de Mecânica Quântica?*

No entanto, para respondê-la, faz-se necessário, primeiramente, responder a questão: Há modificação e/ou construção de novos *drivers* hiperculturais durante a mediação digital caracterizada pelo uso de laboratórios virtuais (ou bancadas virtuais) que possibilitem o estudo de um tópico da teoria quântica?

Portanto, deve-se investigar se, após a mediação digital, ocorrem mudanças e/ou aquisição de novos *drivers* e imagens mentais na estrutura cognitiva do estudante, auxiliando-o no processamento de informações. Para que, assim, a partir desta verificação inicial, levantar o perfil epistemológico dos estudantes acerca do tema da dualidade onda-partícula, e, eventualmente, tentar estabelecer uma relação entre este perfil e suas imagens mentais e *drivers*.

## 1.3 OBJETIVOS

Reconhecida a importância da utilização de ferramentas hiperculturais no ensino da Mecânica Quântica, apresentam-se, a seguir, os objetivos para esta pesquisa.

---

<sup>3</sup> Optou-se por expressar o problema de pesquisa com termos da teoria utilizada. Por ora, o leitor pode considerar que “*drivers*” são apresentados pela Teoria da Mediação Cognitiva como “máquinas virtuais” internas, armazenando informações através da sua interação com mecanismos externos, os *drivers* são acessados pelo cérebro.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Utilizar bancadas virtuais como mediação hipercultural no processo de construção de conhecimentos relacionados ao comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética, tendo a finalidade de verificar quais representações e *drivers* de estudantes de física são adquiridos ou modificados após a utilização de ferramentas hiperculturais para, fazendo o uso dessa verificação, analisar o perfil epistemológico dos discentes diante da noção de conceitos acerca da dualidade, relacionando-os.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Identificar os *drivers* utilizados pelos estudantes no pré-teste e no pós-teste por meio da linguagem verbal e não verbal (gestual);
- ✓ Verificar as possíveis modificações que tenham ocorrido na estrutura cognitiva dos estudantes após as atividades realizadas com os laboratórios virtuais;
- ✓ Reconhecer as interpretações utilizadas pelos estudantes ao responderem as questões propostas no pré-teste e pós-teste;
- ✓ Levantar o perfil epistemológico expresso pelo estudante acerca dos fenômenos da dualidade onda-partícula;
- ✓ Relacionar o perfil epistemológico privado dos estudantes com suas imagens mentais e *drivers*.

A presente dissertação divide-se em sete capítulos. No capítulo 2 (dois), será apresentada a revisão da literatura, contendo 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 Teoria da Mediação Cognitiva, formulada por Souza (2004) e a ideia de perfil epistemológico (BACHELARD, 1991),

forneendo a base para a construção, desenvolvimento, aplicação e interpretação dos dados coletados nesse trabalho de pesquisa.

No capítulo 4 (quatro), será exposto o aporte teórico da física, isto é, a dualidade onda-partícula, conectada com os *softwares* em forma de laboratórios virtuais, e as quatro principais interpretações da MQ.

No capítulo 5 (cinco), será abordado 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 tecidas as discussões e os resultados do experimento proposto por esta pesquisa. Buscou-se apontar as interpretações e os perfis epistemológicos dos estudantes a respeito dos fenômenos estudados através dos laboratórios virtuais, verificando as mudanças ocorridas na estrutura cognitiva do estudante.

No capítulo 7 (sete), serão apresentadas as considerações finais deste trabalho, com 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 que irá nortear a pesquisa que culminou nesta dissertação. Inicialmente, será tratada a metodologia utilizada neste processo, seguida das abordagens dos trabalhos classificados e presentes nos dois grupos elegidos.

### 2.1 METODOLOGIA ADOTADA NA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista o tema do presente estudo, apresenta-se a seguir uma revisão da produção acadêmica recente, publicada entre os anos de 2004 e 2014, sobre o ensino de um tópico fundamental da Física Moderna e Contemporânea - a dualidade onda-partícula. A pesquisa envolveu a consulta a artigos das principais revistas da área de ensino de ciências, 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 gama de trabalhos resultou em uma amostra de 79 artigos, sendo que esta escolha se deu mediante a leitura de seus resumos. A partir dos trabalhos consultados, foi possível compor, de acordo com os objetivos propostos por esta pesquisa, dois grupos: (I) Propostas de ensino da dualidade onda-partícula; (II) Levantamento de concepções e interpretações acerca da dualidade. Dentro destes dois grupos são apresentados 16 artigos, selecionados de acordo com a importância e relação com a linha de pesquisa desta dissertação.

A categoria (I) refere-se à implementação em sala de aula de estratégias didáticas para o ensino da dualidade, tanto para o nível médio, superior e pós-graduação (formação continuada de professores). Como exemplo, pode-se citar planos de ensino não tradicionais e também ênfase na inclusão de tecnologias, como *softwares* computacionais. A categoria (II) engloba trabalhos que apresentam levantamentos de concepções, interpretações, conhecimentos prévios e perfis conceituais de estudantes e professores acerca do tema da dualidade onda-partícula.

É importante ressaltar que a categorização descrita acima não é a única possível e que alguns dos trabalhos revisados encontram-se citados em mais de uma categoria. Não é o objetivo dessa revisão realizar qualquer análise crítica a respeito do material consultado.

## 2.2 PROPOSTAS DE ENSINO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Paulo e Moreira (2004) ministraram conteúdos sobre os conceitos fundamentais da MQ para turmas do primeiro e segundo ano do ensino médio de duas escolas públicas. As turmas de primeiro ano tiveram aulas sobre óptica ondulatória antes da implementação da unidade didática, sendo que, após a atividade, o tópico intitulado “Experimento de Dupla Fenda e suas implicações filosóficas” foi incluído oficialmente no planejamento pedagógico anual da disciplina Física, para a primeira série do ensino médio. De acordo com os autores, os resultados obtidos indicam que os alunos não apresentaram dificuldades em aprender os conceitos quânticos abordados que sejam maiores que os problemas em aprender conceitos clássicos, e que o conhecimento prévio sobre ondulatória clássica, por parte dos alunos, não parece influenciar criticamente na aprendizagem.

Ostermann e Ricci (2004) implementaram uma unidade didática conceitual sobre MQ em uma disciplina de um curso de pós-graduação para professores. A unidade didática foi elaborada com base nos trabalhos de Müller e Wiesner (2002), Pessoa Jr (1997) e Ireson (2000), utilizando a óptica ondulatória como introdução ao “mundo quântico”, empregando atividades com dois *softwares* computacionais em forma de bancadas virtuais, os quais representam o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (IMZ) e o experimento da Dupla Fenda de Young. Os resultados demonstraram que os professores-alunos apresentavam lacunas importantes em relação aos aspectos conceituais básicos de MQ, antes das atividades. Ainda de acordo com os autores, com o desenvolvimento da unidade conceitual foi possível promover mudanças nas concepções dos sujeitos, principalmente as que se referem às diferenças entre objetos clássicos e quânticos.

Em outra investigação, Ostermann e Ricci (2005) reestruturaram a unidade didática citada no estudo anterior com o desenvolvimento das atividades centradas nos roteiros exploratórios construídos a partir dos *softwares*, sugerindo o uso de tecnologias para o aprendizado de conceitos centrais da MQ. Como material de apoio, também foram utilizados um texto produzido pelos autores e o livro “Alice no país do quantum”, de Robert Gilmore. Os resultados apresentam mudanças nas concepções dos sujeitos e, novamente, os autores reforçam as mudanças conceituais sobre as diferenças entre objetos clássicos e quânticos.

McKagan et al. (2008) fornecem uma visão geral das simulações que abordam conteúdos da MQ desenvolvidas pelo “*The Physics Education Technology Project*” (PhET), descrevendo, também, resultados e propostas de pesquisas já efetuadas com as simulações computacionais interativas. Dentre as dezoito simulações apontadas, destacam-se duas que podem ser diretamente aplicadas no ensino da dualidade onda-partícula: uma simulação que apresenta o efeito fotoelétrico e uma que demonstra o fenômeno de interferência de ondas. Em suas conclusões, os autores apontam que as simulações interativas do PhET ajudam os estudantes a entender os conceitos abstratos e contra-intuitivos da MQ, proporcionando, assim, maiores possibilidades de aprendizado.

Betz, Lima e Mussatto (2009) apresentam um recurso eletrônico destinado a apoiar o estudo da dualidade onda-partícula. O material está organizado em “objeto de aprendizagem”, e os autores utilizam o IMZ para abordar as interações e ilustrações convenientes dos conceitos. Textos auxiliares apresentam o formalismo matemático subjacente, bem como informações históricas, epistemológicas e experimentais. A animação e ilustrações apresentam basicamente as explicações dos fenômenos, de acordo com a interpretação de Copenhague, ou de Bohr e Von Neumann. O material desenvolvido foi utilizado em uma aula presencial, na disciplina de Introdução à Física Quântica, do curso de Licenciatura em Física. Não foram obtidos dados suficientes para uma avaliação sistemática da proposta. Através das perguntas e apontamentos feitos pelos alunos ao longo da atividade, os autores apresentam perspectivas para próximos trabalhos com a abordagem de novas interpretações e, conseqüentemente, uma comparação entre elas.

Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009) apresentam a potencialidade do IMZ para o ensino de tópicos de MQ e, em especial, a dualidade onda-partícula. A abordagem se deu pela introdução de conteúdos através de analogias entre a MQ e a física ondulatória clássica. A unidade didática proposta toma como premissas de ensino a analogia como facilitadora na aprendizagem do princípio da correspondência (uso do limite clássico da MQ) e que o IMZ deve favorecer o entendimento do problema do “percurso” seguido pelo fóton. Esta unidade didática foi implementada com 11 estudantes, que, dispostos em quatro duplas e um trio, analisavam o IMZ. Em suas conclusões, os pesquisadores afirmam que: os guias de atividade conduziram os estudantes às analogias entre a MQ e a física clássica; as concepções errôneas, a respeito dos objetos quânticos serem interpretados a todo o momento como “partículas clássicas”, são evitadas pelo fato de os fenômenos observados na bancada virtual mostrarem o comportamento diferenciado do fóton.

Solbes e Sinarcas (2010) desenvolveram uma proposta didática para o ensino de FQ que inclui todos os aspectos conceituais, procedimentais e de relações. Esta decisão engloba os principais caminhos apontados em Solbes e Sinarcas (2009) para a introdução de conteúdos quânticos: o axiomático, o experimental e o histórico. A atividade abrange oito principais objetivos e oito dificuldades, sendo uma dificuldade atrelada a cada objetivo. Os três primeiros objetivos englobam discussões que subsidiam o estudo do comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética. A proposta didática pode ser vista como uma espécie de manual a ser seguido pelo professor, pois é composta de atividades experimentais (virtuais, reais e mentais), contextualizações, problematizações históricas e atividades teóricas em debates. Todas as atividades contêm um texto chamado de “comentários para o professor”, formado por explicações das atividades e pontos que podem ser abordados durante ou após as atividades.

Neto, Ostermann e Prado (2011) elaboraram uma proposta de ensino para a dualidade onda-partícula em uma turma de um curso técnico em radiologia médica. Os autores utilizaram o IMZ virtual para abordar os conceitos centrais da dualidade, optando pela adoção da interpretação ondulatória da MQ, já que esta construção permite analogias e uma relação praticamente direta com a óptica ondulatória clássica. De acordo com a metodologia adotada, interação entre alunos e trabalho colaborativo, a investigação se apoia na teoria sócio interacionista de Vygotsky. Os resultados apontaram que as atividades com o IMZ virtual possibilitaram representações visuais com grande fidelidade dos fenômenos, proporcionando uma abordagem mais conceitual e qualitativa da MQ, mantendo o interesse dos alunos no conteúdo.

Castrillón, Freire Jr e Rodríguez (2014) apresentam uma proposta didática chamada de Mecânica Quântica Fundamental (MQF), composta por seis sequências didáticas e dirigida a professores em formação e a estudantes do ensino médio. A MQF é uma exposição dos experimentos e conceitos fundamentais da MQ, com sua construção teórica baseada principalmente nos fenômenos observados nos experimentos de Stern-Gerlach, Dupla Fenda de Young e IMZ. Como conclusões gerais do trabalho, os pesquisadores ressaltam a importância do ensino de tópicos de MQ com ênfase conceitual. Partindo dos principais problemas discutidos ao longo da construção da teoria, também afirmam que a MQ é uma teoria científica presente na cultura, filosofia e tecnologia atual.

### 2.3 LEVANTAMENTO DE CONCEPÇÕES E INTERPRETAÇÕES ACERCA DA DUALIDADE

Ostermann e Ricci (2004), em seu trabalho realizado em uma turma de pós-graduação, levantaram algumas concepções de professores de física, atuantes no ensino médio, acerca dos objetos quânticos. Para a maioria dos professores da amostra (dezoito no total):

(a) os objetos quânticos são necessariamente relativísticos; (b) falta de clareza sobre os limites de validade da MQ e da Física Clássica (macroscopia *versus* microscopia); (c) as leis de conservação (da energia e do momentum linear) só se aplicariam à Física Clássica; (d) associar atributos físicos aos objetos clássicos, os quais também são propriedades de objetos quânticos (a massa, principalmente); (e) a associar à natureza probabilística de objetos quânticos a impossibilidade dele ser observável diretamente; (f) que os objetos quânticos possuem, necessariamente, propriedades físicas discretas; e (g) que o fóton só existe nas transições atômicas (OSTERMANN; RICCI, 2004, p. 251).

Os autores ressaltam que Müller e Wiesner (2002) obtiveram resultados semelhantes em entrevistas realizadas com os alunos de graduação e futuros professores de ensino médio.

Wuttiptom et al. (2009) descrevem a elaboração de um questionário de MQ e aplicação desse a uma turma de estudantes de cursos de Física. O questionário passou por um processo de validação e, posteriormente, foi aplicado a 312 indivíduos. Os autores calcularam, ainda, a média de dificuldade do teste e o seu poder de discriminabilidade, obtendo resultados adequados em relação à literatura. O teste aborda o efeito fotoelétrico, ondas e partículas, comprimento de onda de De Broglie, experimento da dupla fenda e Princípio da Incerteza. Uma conclusão apresentada pelos autores é a de os estudantes acertarem mais questões factuais e procedimentais que questões conceituais, sendo isso um indicativo de aprendizagem mecânica.

Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009) aplicaram um teste de concepções relativas à dualidade onda-partícula, em uma turma de catorze alunos, da sétima etapa do curso de licenciatura em física. Para tanto, foi elaborado e validado um instrumento composto por dezesseis questões sobre o efeito fotoelétrico, experimento da dupla fenda e o IMZ. Esta etapa de levantamentos de concepções é apenas uma fase inicial de um estudo muito mais amplo sobre o uso do IMZ no ensino da MQ. Os resultados, de um modo geral, apontam que, apesar de todos os estudantes terem demonstrado conhecimento acerca do comportamento dual dos fótons, muitos deles não conseguem reconhecer com clareza quais são as situações em que o fenômeno é essencialmente corpuscular ou tipicamente ondulatório. Os pesquisadores acreditam que a falta de clareza por parte dos estudantes é reflexo da “abordagem semi

clássica utilizada nas disciplinas introdutórias de MQ, cujo enfoque é demasiadamente centrado nos aspectos históricos da teoria” (PEREIRA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2009, p. 82).

Çaliskan, Sezgin e Erol (2009) produziram um questionário de concepções em MQ, o “*quantum concepts questionnaire*” (QCQ), aplicado a setenta e um alunos do curso de Física. O QCQ é um questionário do tipo Likert, de vinte e seis questões. Como resultado das aplicações, os pesquisadores constataram que os alunos, entre outras concepções: associam a MQ à probabilidade e à estatística; acreditam não ser possível a determinação da trajetória do elétron; discordam que a medição da posição do elétron resulte sempre no mesmo valor; acreditam ser o elétron, segundo o princípio da complementaridade, onda e partícula; acreditam ser o movimento do elétron no átomo, semelhante ao movimento planetário; discordam de que o módulo quadrático da função de onda tenha significância física.

Baily e Finkelstein (2010) investigam variações nas abordagens de ensino em dois cursos de MQ, em uma universidade americana, buscando examinar os impactos causados pelas abordagens adotadas nas perspectivas dos alunos sobre a MQ. Os resultados apresentados pelos pesquisadores apontam que os alunos são mais propensos a adotar interpretações realistas na análise dos fenômenos quânticos quando os professores não abordam explicitamente as ontologias dos estudantes. Também foram observadas variações contextuais nas crenças dos estudantes sobre os sistemas quânticos, indicando que os professores que optarem por abordar questões ontológicas na MQ devem utilizar, explicitamente, uma variedade de tópicos do conteúdo.

Ayene, Kriek e Dantie (2011) realizaram um estudo fenomenográfico para levantar e categorizar descrições de conceitos fundamentais de MQ expostos pelos alunos. Os conceitos sondados pelos pesquisadores estão relacionados com o princípio da incerteza e a dualidade onda-partícula em experimentos da MQ. Os dados para o presente estudo foram obtidos por meio de entrevistas semi estruturadas, aplicadas a alunos de graduação em física. As concepções sobre a dualidade onda-partícula foram divididas em três categorias, a saber: (1) descrição clássica; (2) descrição clássica-quântica e (3) descrição quase quântica (“*quase quantum description*”). No geral, os resultados assinalam que os alunos são mais propensos a preferir um quadro clássico para as interpretações da MQ. No entanto, poucos estudantes da categoria (3) utilizavam os fenômenos tipicamente ondulatórios, como a interferência e difração, para explicar as propriedades ondulatórias das entidades quânticas, como o elétron.

Zhu e Singh (2012) descrevem as dificuldades e concepções de estudantes em fase final da graduação e início de pós-graduação a respeito da medição dentro da interpretação

padrão (Copenhague) da MQ. Os resultados foram obtidos por meio das respostas dos alunos para os questionários elaborados pelos autores. Nas conclusões gerais, os pesquisadores apontam uma confusão dos alunos em relação ao sistema físico. Eles não sabem se o sistema permanece preso no estado em que ele entrou em colapso, logo após a medição, ou se ele volta ao estado inicial (anterior) à medição. Em geral, os alunos apresentam dificuldades com questões relacionadas à evolução temporal da função de onda após a medição. Os resultados desta pesquisa são aplicados para desenvolver tutoriais de aprendizagem no auxílio à compreensão dos alunos sobre a medição na MQ.

Por meio dos trabalhos apresentados, é possível constatar uma relação direta entre o aprendizado, isto é, alteração das concepções dos estudantes a respeito de conceitos quânticos e a utilização de bancadas virtuais como propostas didáticas, no ensino de tópicos de MQ, em diversos níveis de ensino. Mostrou-se, também, uma corrente de autores em defesa de uma abordagem conceitual em cursos introdutórios de MQ, dando significado aos fenômenos estudados. Ainda foi possível observar resultados demonstrando que a física clássica não deve necessariamente ser pré-requisito para o entendimento de tópicos de MQ.

Sendo assim, esta revisão de literatura corrobora a importância do objetivo desta pesquisa, na qual busca-se verificar quais mudanças ocorrem na estrutura cognitiva do estudante após a utilização de *softwares* em forma de bancadas virtuais e analisar o perfil epistemológico dos mesmos acerca dos conceitos quânticos abordados. Através de seus resultados, esta pesquisa visa contribuir na melhora da formação inicial do professor de física no que se refere aos aspectos conceituais da MQ.

A seguir, será tratado o referencial teórico adotado por esta pesquisa.

## CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, será abordado o referencial teórico responsável por fundamentar esta pesquisa. Pelo fato deste trabalho estar utilizando softwares em forma de bancadas virtuais como mediadores no ensino de um tópico da MQ, optou-se pela adoção da Teoria da Mediação Cognitiva (TMC) como aporte teórico norteador, em razão da sua abordagem relacionada à mediação hipercultural, em especial mediante o uso de computadores. Também será apresentada a ideia de perfil epistemológico Bachelardiano, tendo em vista que, esta pesquisa busca levantar os perfis privados dos estudantes acerca da dualidade onda-partícula. Além disso, será discutida a visão assumida a respeito dos conceitos de imagens mentais.

Inicialmente, será apresentada uma discussão sobre os impactos causados pelas tecnologias na sociedade. Na sequência, tratar-se-á a essência da teoria construída por Bruno Campello de Souza (2004) e seus colaboradores, seguida de alguns exemplos de aplicações da TMC em trabalhos de pesquisa na área de Ensino de Ciências. Após, explana-se a ideia de perfil epistemológico proposta por Bachelard (1991). O capítulo encerra-se com a discussão da visão assumida acerca da noção de imagens mentais.

### 3.1 A TEORIA DA MEDIAÇÃO COGNITIVA (TMC)

A Teoria da Mediação Cognitiva (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, apresentando uma visão da cognição como um fenômeno de processamento de informações, onde uma boa parte do processamento é feito fora do cérebro.

#### 3.1.1 A Era Digital e o Surgimento da Hipercultura

Atualmente, vivencia-se 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). Esta

informação está disponível às pessoas através do simples acesso a internet ou em um clique de um *mouse* para abrir um aplicativo.

Neste panorama, os resultados do relatório anual do Centro de Estudos sobre as Tecnologias da Informação e Comunicação (CETIC) apontam que 80%<sup>4</sup> dos estudantes de ensino médio no sul do Brasil possuem computador em seu domicílio e 75%<sup>5</sup> dos estudantes do ensino médio acessam a internet pelo telefone celular. As potencialidades comunicativas destes dispositivos são cada vez mais marcantes e os adolescentes de hoje vivem imersos num contexto de hipermídia bastante amplo, diferentemente dos adolescentes do século XX. E, ao que tudo indica, porções cada vez mais significativas da população acessam a internet de forma progressiva e frequente, bem como interagem com diversos aparelhos digitais.

Neste tocante, de acordo com Souza (2004), pode-se imaginar como essa 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 acesso instantâneo de informação que flui na rede de computadores, o autor acredita na possibilidade de crescimento cognitivo nos indivíduos, resultante da manipulação dos *hardwares* e da interpretação dos *softwares*. Isso significa, de um modo geral, 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 destes grupos. Portanto, o papel da tecnologia da informação (TI) no pensamento humano pode ser considerado uma nova forma de mediação cognitiva com um alcance superior as modalidades anteriores como a mediação cultural, por exemplo.

Diante deste cenário oriundo da ascendente era digital, o autor visualiza a existência de uma Hiper cultura, ao argumentar que:

[...] testemunha-se a emergência de uma Hiper cultura, 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).

---

<sup>4</sup> Disponível em: <<http://www.cetic.br/educacao/2013/alunos/B5.html>>. Acesso em 15 de Maio de 2015.

<sup>5</sup> Disponível em: <<http://www.cetic.br/educacao/2013/alunos/B12.html>>. Acesso em 15 de julho de 2015.

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 TI, “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 as 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 Hiperculturalidade no grupo de participantes do Enem 2000 - médicos, adultos e profissionais recifenses. Assim, constatou que o surgimento da Hipercultura está associado às novas formas de pensamento, apresentando ganhos cognitivos que independem de variáveis como sexo, renda e nível de educação (RAUPP et al., 2010; SOUZA; ROAZZI, 2007, 2009; SOUZA, 2006; SOUZA et al., 2010). A partir desses resultados, Souza (2004, 2009, 2012) apresenta a Teoria da Mediação Cognitiva. Seus principais fundamentos são 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 a 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 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. Neste tocante, Souza (2004) cita diversos autores (MILLER, 1956; MERKLE, 1989; WARD, 1997; LLOYD, 2002; WHITE, 2003) 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” através 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 através de agentes externos.

Diante desse cenário, a TMC parte dos princípios de que cognição humana depende fundamentalmente do processamento de informações, e que o cérebro humano isolado apresenta-se como insuficiente para explicar a maior parte do desempenho cognitivo, com os quais pode-se 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 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). Pode-se, 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, tem-se uma imagem da cognição humana, arquitetada através do resultado de processamento de informações, sendo que uma parte importante desse processamento é realizado fora do cérebro, pois o mesmo é limitado para processar todas as informações disponíveis.

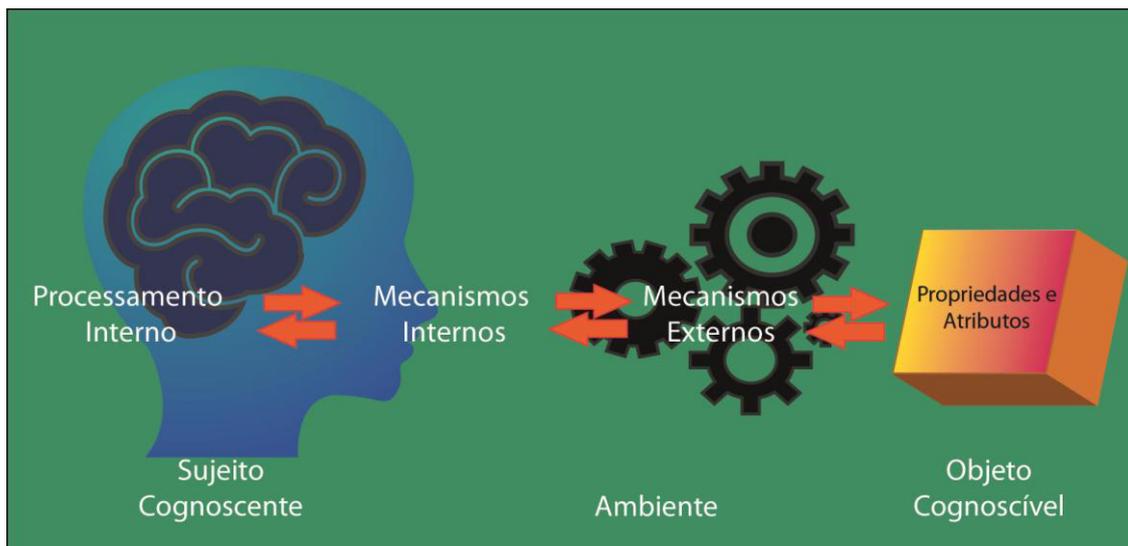
“O processo pelo qual os seres humanos dependem de estruturas externas, a fim de complementar o processamento de informações feito por seus cérebros (cognição

extracerebral) é chamado pela TMC de Mediação” (SOUZA et al., 2012, p. 2, tradução nossa). Essa mediação é composta e pode ser escrita através 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 endócrino) 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 1 apresenta uma síntese de como ocorre o processamento cognitivo através de estruturas do ambiente, responsáveis por fornecerem uma capacidade adicional de processamento de informações.

Figura 1 - 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, se está 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 através 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 no processamento de informações. Torna-se claro o fato da 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, possuindo um papel importante na definição do pensamento humano, indo 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.

Este 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 estes 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, isto pode ser conseguido por meio de uma representação mental de um sistema físico que é composta de 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 para interagir com ele para fins de processamento de informação. Portanto, o desenvolvimento deste "mecanismo interno" ocorre por meio da interação entre o indivíduo e o sistema físico correspondente, ou seja, através do processo descrito em Epistemologia Genética de Piaget como "equilibração" (SOUZA, et al., 2012, p. 3, tradução nossa).

Neste tocante, considera-se que a mediação cognitiva ocorre como função necessária ao impulsionamento da inteligência, relacionando 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, objetivando a aquisição de conhecimentos e conseqüentemente o desenvolvimento da sua estrutura cognitiva.

### 3.1.4 Formas de mediação

Como já fora discutido, 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. Essas formas 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 num 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 sensorio-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 à distância, a vibração do solo para se detectar a aproximação de uma manada de búfalos, as pegadas para rastrear uma presa. Outra situação 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.

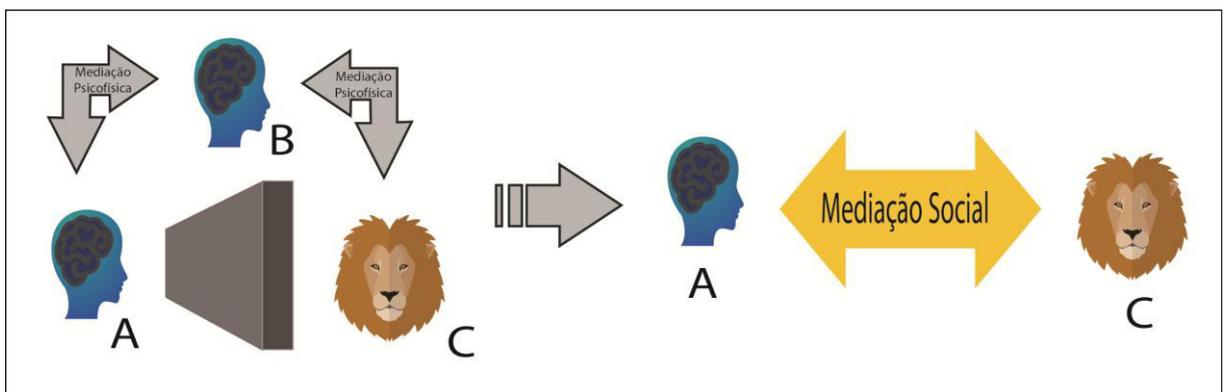
Todos esses casos, sejam eles intencionais ou fortuitos, representam instâncias básicas de mediação cognitiva, conseqüentemente *drivers* psicofísicos são criados ou modificados após a ocorrência desse processamento externo.

### Mediação Social

Quando se colocam diversos sujeitos num mesmo ambiente, fatalmente 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 torna-se única, mas segue potencializada com a possibilidade de o mesmo 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: 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, mas 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 2 - 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). À vista disso, 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 duradouro for a existência desse grupo, assiste-se a 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, se deparar com uma placa na qual contém apenas uma imagem (ver figura 3), possivelmente esse sujeito saberá que está em um ambiente “perigoso”, devido à exposição de radiação, tomando assim as devidas precauções. Este signo relacionado à radiação foi construído culturalmente, devido a isso, o sujeito pode processar uma informação externa através da mediação cultural, sem a necessidade de utilizar algum objeto de detecção de radiação, por exemplo.

Figura 3 - 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 tocante, pode-se confirmar que qualquer ganho em intelecto da parte de um membro é um constante estímulo ao desenvolvimento dos demais.

### Mediação Hiper cultural

Ao longo das últimas duas décadas, presencia-se 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 fora mencionado anteriormente em relação à revolução digital e ao surgimento de uma hipercultura. Essas transformações no acesso ao computador e a *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 ínterim, 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 (teoremas-em-ação) e *drivers* no cognitivo do indivíduo, com a finalidade de proporcionar uma aprendizagem significativa dos conceitos abordados. Lembrando que a proposta central deste trabalho é a de utilizar justamente o processamento extracerebral, via mediação hipercultural no ensino de tópicos de MQ.

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

### A evolução das formas de Mediação Cognitiva

Através das quatro formas de mediações propostas pela TMC, recém-apresentadas, verifica-se, 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, a seguir.

Quadro 1 - A evolução das formas de mediação cognitiva.

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

Fonte: Souza, 2004.

Através das informações contidas no 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. 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 Suporte teórico da TMC**

Conforme fora mencionado anteriormente, a TMC está embasada em quatro aportes teóricos desenvolvidos por Jean Piaget, Gérard Vergnaud, Lev Semenovitch Vygotsky e Robert Sternberg. A seguir, serão descritos sinteticamente as implicações de cada uma destas teorias na construção da TMC.

#### As contribuições de Vygotsky

Ao longo do processo evolutivo, o homem tem demonstrado a capacidade de se adaptar, interagir e dominar a natureza, conseguindo, dessa forma, tirar benefícios próprios criando um ambiente de interação social dele com a natureza. Contudo, o homem modifica a natureza e essa transfere as suas mudanças ao próprio homem. Um dos pilares da teoria sócio-construtivista de Vygotsky é o de que o desenvolvimento humano ocorre por meio de interação social e, nessa interação social, ocorre a transmissão cultural e o desenvolvimento cognitivo (VYGOTSKY, 1984). Isto é, o desenvolvimento cognitivo não ocorre independente do contexto social, histórico e cultural.

A linguagem e os signos são fundamentais nesse processo. De acordo com Vygotsky (1984), após o seu domínio, eles propiciam ao ser humano o desenvolvimento mental. Lembrando que a cultura na qual determinado ser humano está inserido que é a responsável por tornar diferenciável, e não comum a todos, os mesmos processos cognitivos. Os processos mentais só podem ser entendidos se os instrumentos e signos que os mediam forem compreendidos.

A TMC incorpora plenamente os aspectos mais essenciais do Sócio-Construtivismo de Vygotsky, particularmente no que concerne ao papel da cultura, dos sistemas de símbolos e dos processos de transmissão e internalização de tais sistemas para o funcionamento da cognição humana. Ela também faz uso da noção de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) enquanto conceito fundamental para se entender a dinâmica do desenvolvimento cognitivo (SOUZA, 2004, p. 95).

A ZDP é considerada por Vygotsky como a distância entre o nível de desenvolvimento cognitivo real do indivíduo, medido por sua capacidade de resolver problemas independentemente, e o seu nível de desenvolvimento potencial, medido por meio da solução de problemas sob orientação. Além disso, a ZDP define as funções que ainda não amadureceram, mas que estão no processo de maturação. Diante dessas definições, afirma-se que a interação social com potencial de provocar a aprendizagem deve ocorrer dentro da ZDP.

A TMC introduz a idéia de que interações humanas, desde aquelas que ocorrem em grupos sociais simples até às das sociedades complexas baseadas em cultura, também funcionam como dispositivos computacionais que são utilizados para atender tanto à coletividade quanto a demandas dos indivíduos que dela fazem parte (SOUZA, 2004, p.124).

As interações sociais estão mudando devido a Revolução digital, esse fato cria a expectativa de mudanças nos processos de pensamento dos indivíduos que a compõem. Conforme Souza (2004, p. 124), “[...] tem-se como resultado que tais mudanças devem associar-se a processos de desenvolvimento e funcionamento cognitivo mais complexos e de maior alcance”.

### As contribuições de Vergnaud

Dentro da teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o conceito de teoremas-em-ação é o principal elemento absorvido pela TMC. O aumento cognitivo dos seres humanos está na tendência da utilização de processamento extracerebral, pois, de acordo com a TMC, quando é estabelecida uma conexão com algum mecanismo externo, a estrutura cognitiva do sujeito precisa criar certos *drivers* que auxiliarão na compreensão do funcionamento desse mecanismo e na sua interação com o mesmo para fins de processamento de informações. Diante deste cenário, consideram-se os *drivers* como representações mentais análogas aos teoremas-em-ação descritos por Vergnaud, desenvolvidos para permitir o processo de mediação e de aquisição de processamento de informações, ao mesmo tempo em que se desenvolvem com a interação entre o indivíduo e o mecanismo acoplado.

Para que essa mediação externa com o ambiente possa ocorrer

[...] é necessário que haja na mente do indivíduo uma representação mental dos objetos ou sistemas usados para mediação ao menos em termos de suas possibilidades computacionais (entrada, saída, relação entre entrada e saída, possibilidades de configuração e controle). Tais representações, junto com os eventuais sistemas simbólicos que os expressam numa linguagem operacional, constituem os mecanismos internos de mediação. Assim, o desenvolvimento cognitivo envolve a interação de um indivíduo com objetos e sistemas que tenham

capacidade de realizar computações, sendo um processo que envolve o surgimento simultâneo dos mecanismos internos e externos de mediação (SOUZA 2004, p. 116).

Com isso, tal indivíduo adquire não apenas a capacidade de alocar para si mesmo recursos em potencial do ambiente, mas também ganha o domínio de uma série de conceitos, metáforas e operações lógicas, expandindo a sua capacidade mental. A existência dos teoremas-em-ação dota no sujeito ferramentas lógicas que aumentam a competência em domínios específicos, mesmo após a ausência do sistema externo correspondente (SOUZA, 2004).

A TMC tem a expectativa de que a Revolução Digital introduz “[...] novas possibilidades de formação de Conceitos e, portanto, de Esquemas e Competências” (SOUZA, 2004, p. 118). Algumas dessas possibilidades são expressas nos termos a seguir: operações lógicas e processamento; dados, informações e conhecimento; conexão, comunicação e acesso.

### As contribuições de Piaget

A TMC incorpora por completo o conceito de assimilação da teoria piagetiana, sendo considerado como o principal componente dinâmico da cognição humana. A assimilação ocorre quando o organismo incorpora uma nova informação oriunda do ambiente, tornando-os compatíveis com os seus esquemas - estrutura mental que possibilita ao sujeito organizar e compreender o meio previamente existente na estrutura cognitiva. No entanto, a TMC acrescenta duas colocações a esse conceito explicado por Piaget. A primeira é que “[...] a assimilação não apenas melhora a relação com o objeto/sistema em si mesmo, mas também apresenta benefícios para finalidades computacionais envolvendo outros objetos/sistemas” (SOUZA, 2004, p.110). A segunda é que, para Piaget, a lógica desenvolvida através da assimilação tende a aproximar-se, gradativamente, da ordem dos objetos ou sistemas, porém na TMC, além disso, a lógica torna-se flexível possibilitando a atribuição de significados e relação entre objetos e sistemas.

Ao tratar sobre a acomodação, a TMC a considera como um processo que acrescenta mecanismos externos e internos de mediação, resultando no surgimento de uma “[...] estrutura cognitiva coesa, integrada e expandida, ao invés de produzir um simples amontoado de lógicas e conceitos” (SOUZA, 2004, p.111).

Em relação ao ambiente, ambos o consideram como sendo um campo de experiências, na teoria piagetiana. As experiências seguem uma ordem, possibilitando a assimilação de uma lógica equivalente a tal ordem, contudo a TMC acrescenta o processamento e comunicação de dados e informação. Dessa forma, Souza (2004) complementa

O espaço onde o indivíduo vivencia suas interações com o mundo é visto como repleto de elementos cujas interações dinâmicas, sejam elas efetivas ou em potencial, oferecem possibilidades para o uso como dispositivos computacionais e/ou redes de comunicação. Uma vez que tais mecanismos de mediação são estabelecidos, essas porções do ambiente são incorporadas no indivíduo como verdadeiras extensões da sua mente (SOUZA, 2004, p.112).

Assim, a TMC atribui ao ambiente um papel cognitivo mais ativo e participativo.

Outro ponto importante de ser abordado é o estágio cognitivo. Segundo a Epistemologia Genética de Jean Piaget, o desenvolvimento cognitivo atinge o seu auge no estágio Operacional Formal. Já a TMC, “[...] considera que não há um patamar máximo discernível para a lógica, mesmo quando se toma o termo no sentido piagetiano” (SOUZA, 2004, p.113). Essa posição já era esperada, visto que a TMC considera os computadores e a *internet* sistemas em constante mudança, surgindo a necessidade de novas lógicas de utilização que modificam as relações cognitivas, alterando as dinâmicas dos grupos sociais.

### As contribuições de Sternberg

A Teoria Triárquica da Inteligência Humana foi construída por Sternberg (1985, 1988 apud SOUZA, 2004) a partir do paradigma do processamento da informação, considerando que a estrutura cognitiva humana possui uma arquitetura específica, portanto, o processamento da informação leva em consideração três tipos de subteorias ou facetas: Analítico, Criativo e Prático. Essas se subdividem em componentes menores que são inter-relações.

A faceta analítica ainda se subdivide em metacomponentes: componentes de desempenho e componentes de aquisição de conhecimento. Essa faceta tem o papel de especificar os processos subjacentes ao processamento de informação para ajudar a compreender a conduta inteligente. A faceta criativa que está subdividida em novidade e automatização envolve o pensamento criativo e o potencial inovador, trata dos aspectos experienciais da inteligência, refletindo como um indivíduo conecta o seu mundo interno à realidade externa. Por fim, a faceta prática, que está subdividida em adaptação, modelagem e

seleção, trata do desenvolvimento da inteligência quando o sujeito se depara com uma situação real, envolve a habilidade de apreender, compreender e lidar com tarefas cotidianas. Seguindo esse contexto, a teoria triárquica da inteligência permite analisar as estruturas internas do sujeito relacionando-as com a sua experiência individual prática.

A relação entre a TMC e a teoria triárquica da inteligência se relacionam na medida em que os *drivers* equivalem-se com a faceta analítica, uma vez que “[...] os Componentes de Aquisição de Conhecimento permitem a assimilação de algoritmos, os Componentes de Desempenho permitem a sua implementação e os Metacomponentes podem controlar o funcionamento do sistema” (SOUZA, 2004, p. 128). As facetas criativas e práticas também são abrangidas pela TMC, na medida em que Souza (2004) faz o paralelo ao explicar que:

As Facetas Criativa e Prática da Teoria Triárquica envolvem a interação entre o indivíduo e o mundo exterior, realizando funções que possibilitam a capacidade de adaptação (resiliência) por assimilação e/ou criação de seqüências inéditas de operações lógicas (novos algoritmos). À luz da TMC, essas sub-teorias de Sternberg explicam o surgimento e funcionamento dos mecanismos internos de mediação, exceto apenas pela diferença de que, no caso da primeira, considera-se que a função primordial dessas estruturas cognitivas seria a de possibilitar o uso de sistemas externos (físicos, sociais, culturais e/ou hiperculturais) como dispositivos computacionais (mecanismos externos), com as demais funções sendo seqüências secundárias (SOUZA, 2004, p. 128).

Embora ambas as teorias baseiem-se no paradigma do processamento de informações, algumas diferenças também são apontadas por Souza (2004). Enquanto a teoria Triárquica estabelece um modelo da cognição humana baseado numa metáfora com um computador, a TMC propõe um modelo baseado numa metáfora com uma rede de computadores elaborando um modelo de cognição baseado nessa rede.

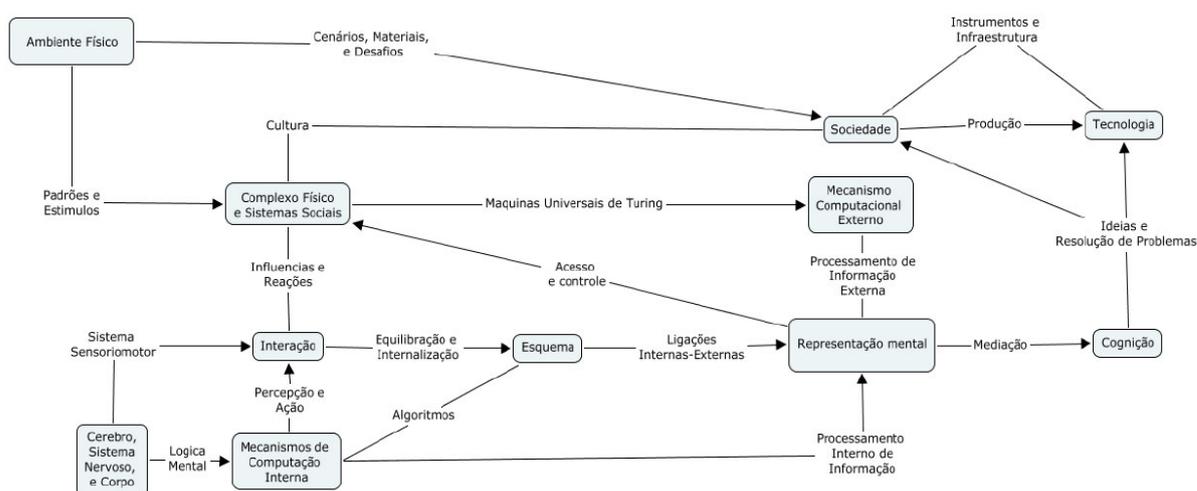
Assim sendo,

[...] a teoria de Sternberg tenta explicar a cognição humana exclusivamente em termos de estruturas individuais internas em interações complexas e adaptativas com um ambiente mutável, enquanto que a TMC procura fazer o mesmo expandindo a metáfora computacional para um grande conjunto de sistemas individuais interagindo por meio de redes complexas em arquiteturas distribuídas (SOUZA, 2004, p. 129).

### 3.1.6 A TMC sintetizada em um mapa conceitual

Com o objetivo de condensar a TMC ao apresentar seus principais conceitos interligados, Souza et al. (2012) constrói um mapa conceitual (Fig. 4). Este trabalho optou por apresentá-lo com o intuito de auxiliar o leitor no seu entendimento a respeito da TMC.

Figura 4 - Mapa conceitual da TMC.



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

Ao analisar este mapa conceitual, percebem-se 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, acredita-se que os subsídios teóricos apresentados sejam suficientes.

### 3.1.6 Exemplos de utilizações da TMC no Ensino de Ciências

Mesmo sendo uma teoria desenvolvida há pouco tempo, a TMC tem sido usada como aporte teórico em trabalhos de pesquisa direcionados à área de Ensino de Ciências. Portanto, nesta seção serão apresentados sinteticamente três trabalhos recentes que optaram pela TMC como seu referencial teórico norteador.

O primeiro trabalho a ser citado é o dos autores Rocha e Andrade Neto (2013), no qual utilizaram uma atividade com um *software* de simulação computacional voltado para o ensino de eletrostática<sup>6</sup>. Esta atividade foi desenvolvida com estudantes de engenharia, dispostos em dois grupos - um experimental, contendo sete alunos e um de controle, com seis alunos. O objetivo do trabalho era o de mostrar evidências de como o *software* de simulação pode se tornar um processamento extracerebral, verificando também as possíveis mudanças na estrutura cognitiva do estudante durante o processo. Para tanto, optaram por uma metodologia composta de cinco etapas: um pré-teste envolvendo resolução de problemas de Eletrostática com todos os alunos da amostra; a entrevista desse pré-teste; o uso do *software* de simulação; a aplicação do pós-teste similar ao pré-teste, após o uso do software; e, por último, a entrevista do pós-teste.

A leitura e interpretação dos dados foram efetuadas de acordo com o aporte teórico da TMC. Diante dos resultados, os autores concluem que

Quando em contato com esse mecanismo de processamento externo (software de simulação) parte de seu conteúdo é internalizado e essas novas informações confrontadas com os *drivers* existentes na estrutura cognitiva do estudante, a partir desse momento novos *drivers* são criados. E dessa forma que os *drivers*, que funcionam com interfaces, são aparentemente consolidados como *scripts*, da mesma forma que novos *drivers* também são criados devido a essa interação hipercultural (ROCHA; ANDRADE NETO, 2013, p. 9).

Diante deste cenário, os autores afirmam que a utilização de uma ferramenta hipercultural oferece grandes perspectivas no aprendizado de conhecimentos científicos.

Outro exemplo a ser citado é o trabalho de Ramos e Andrade Neto (2013), realizando um estudo exploratório com o objetivo de apresentar uma análise de como o uso de um *software* de modelagem molecular (*Spartan* versão 5.0) no ensino de química pode se tornar uma ferramenta de processamento extracerebral, e quais as possíveis modificações que ocorrem na estrutura cognitiva dos estudantes nesse processo. Os autores optaram por utilizar como referencial teórico a TMC associada à Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, já que o foco do trabalho está no estudo de como ocorre a aprendizagem de conceitos químicos com a mediação por computador (hipercultural).

O estudo foi desenvolvido com seis estudantes que cursavam o primeiro semestre de um curso técnico em química, os quais manusearam o *software* de modelagem molecular enquanto resolviam situações-problema envolvendo conteúdos de estereo isomeria *cis/trans*.

---

<sup>6</sup> O software chama-se “Taxas e campos” e está disponibilizado gratuitamente em: [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/charges-and-fields](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/charges-and-fields).

A metodologia do trabalho foi composta de cinco etapas: pré-teste individual; entrevista individual do pré-teste; atividade em dupla com a simulação; pós-teste individual; e entrevista do pós-teste. Após o registro em vídeo das atividades e produção dos dados, os resultados foram obtidos por meio da análise gestual (MONAGHAN; CLEMENT, 1999).

A principal conclusão que os autores chegam ao analisar os resultados do experimento foi que:

(...) a mediação com o computador – atuando como um mecanismo de processamento externo – permitiu que o estudante pudesse não somente melhorar alguns “*drivers*” existentes na sua estrutura cognitiva (de visualização, por exemplo), mas também criar novos “*drivers*” (de rotação 3D intramolecular, por exemplo) que são utilizados mesmo quando a conexão com o mecanismo de processamento externo foi desfeita (RAMOS; ANDRADE NETO, 2013, p. 7).

Diante disso, pode-se afirmar que o *software* utilizado configurou-se como processador externo de informação, interagindo com a estrutura cognitiva dos estudantes por mediação hipercultural.

Além desses dois exemplos, apresenta-se também o trabalho de Trevisan e Andrade Neto (2014)<sup>7</sup>, no qual os autores investigam quais representações e *drivers* são adquiridos ou modificados após a utilização de ferramentas hiperculturais sob a forma de bancadas virtuais. Para tanto, foi escolhido como conteúdo de conhecimento o comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética, tópico fundamental da MQ, dentro do currículo de estudantes de licenciatura em física.

As atividades da pesquisa foram desenvolvidas com um grupo de sete estudantes que cursavam a fase final do curso de Licenciatura em Física, sendo quatro discentes de uma instituição de ensino pública e três de uma instituição privada. O desenvolvimento da atividade foi composto de quatro etapas, sendo elas: pré-teste individual; roteiro de atividades para conduzir à utilização dos dois softwares<sup>8</sup> propostos - o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder e o arranjo experimental da Fenda Dupla de Young; pós-teste individual; e entrevista do pós-teste.

Os resultados foram obtidos após as análises realizadas sobre os pré-testes, os pós-testes e a análise dos gestos descritivos obtidos das imagens de vídeo gravadas durante as entrevistas do pós-teste, sendo que o referencial teórico adotado para leitura dos dados foi a

---

<sup>7</sup> Este trabalho é parte integrante da pesquisa que está sendo realizada e o mesmo será melhor explicado no capítulo 5 desta dissertação.

<sup>8</sup> Os *softwares* são livres e estão disponíveis para download em: <http://migre.me/mOI09> e <http://migre.me/mOIIA>.

TMC, buscando explicar como a mediação por computador modifica a estrutura cognitiva dos estudantes.

As principais conclusões dos autores são de que

Os softwares utilizados neste trabalho, caracterizados como laboratórios virtuais (ou bancadas virtuais), apresentaram-se como processadores externos de informação, auxiliando no processamento interno na estrutura cognitiva dos estudantes, o que resulta na mudança de *drivers* psicofísicos e culturais já existentes, proporcionando, portanto, uma evolução conceitual, evidenciada pelos alunos durante os testes e as entrevistas.

Os softwares de simulação usados neste trabalho, não se mostraram eficazes para uma nova aquisição de *drivers* microscópicos resultantes de uma ferramenta hipercultural. Os *drivers* psicofísicos e culturais prevalecem no momento da resolução e explicação dos problemas (TREVISAN; ANDRADE NETO, 2014, p. 9).

Contudo, os autores finalizam acreditando que a utilização de simulações conceituais, onde objetos quânticos são representados, possibilitará a aquisição de novas representações e *drivers*.

### 3.2 A IDEIA DE PERFIL EPISTEMOLÓGICO BACHELARDIANO

O positivismo atribuído à pesquisa científica, bem como a objetividade no trabalho dos cientistas, é um fator que contraria as ideias de Bachelard, apresentadas em suas obras como “O Novo Espírito Científico” (1985) e “A Filosofia do Não” (1991). Ressalta, então, a necessidade de construção de um pensamento complexo para a ciência e uma postura de reflexão filosófica sobre a prática científica.

Bachelard propõe executar diálogos ininterruptos entre valores experimentais e os valores racionais, característica da contemporaneidade, nos quais

[...] o empirismo e o racionalismo estão ligados, no pensamento científico, por um estranho laço tão forte como o que une o prazer à dor. Com efeito, um deles triunfa dando razão ao outro: o empirismo precisa ser compreendido; o racionalismo precisa ser aplicado. Um empirismo sem leis claras, sem leis coordenadas, sem leis dedutivas não pode ser nem pensado, nem ensinado; um racionalismo sem provas palpáveis, sem aplicação à realidade imediata não pode convencer plenamente. Prova-se o valor real de uma lei empírica fazendo dela a base de um raciocínio. Legitima-se um raciocínio fazendo dele a base de uma experiência (BACHELARD, 1991, p. 4).

Com o intuito de mostrar que diferentes filosofias podem estar presentes na mesma acepção de um conceito, ainda que algumas delas sejam conscientemente consideradas inadequadas para caracterizar determinada noção do conhecimento científico, Bachelard

(1991) apresenta ideias vinculadas ao termo por ele denominado como “perfil epistemológico”, “[...] uma escala polêmica suficiente para localizar os diversos debates da filosofia da Ciência, para impedir a confusão dos argumentos” (BACHELARD, 1991, p.55). Caracterizando, portanto, justamente as diversas escolas filosóficas e posturas de natureza epistemológica dos sujeitos, ou seja, essa pluralidade representa diferentes formas de ver e representar a realidade, tanto para o mesmo sujeito em relação a um conceito científico, quanto para um mesmo conceito, em diferentes contextos históricos.

Em sua obra “A Filosofia do Não” (1991), Bachelard apresenta suas ideias que culminam no termo cunhado como “perfil epistemológico”, utilizando, para tanto, dois exemplos constituídos por duas construções gráficas, as quais permitem ao autor traçar e analisar o seu perfil epistemológico pessoal acerca da definição do conceito de massa e energia.

Primeiramente, observa-se o gráfico construído para o conceito de massa.

Figura 5 - Perfil epistemológico da noção pessoal de massa.



Fonte: Bachelard, 1991, p. 25.

No eixo das abcissas, são indicadas as filosofias sucessivas e, no eixo das ordenadas, um valor que corresponde à frequência efetiva com que tal filosofia é expressada por Bachelard a respeito da sua noção de massa. Verifica-se que as cinco filosofias consideradas pelo autor são: realismo ingênuo, empirismo claro e positivista, racionalismo clássico da mecânica racional, racionalismo completo (relatividade) e o racionalismo discursivo. Dentre elas, de acordo com o gráfico apresentado, a visão racional da mecânica clássica é destacada, aparecendo com maior influência na construção da noção de massa.

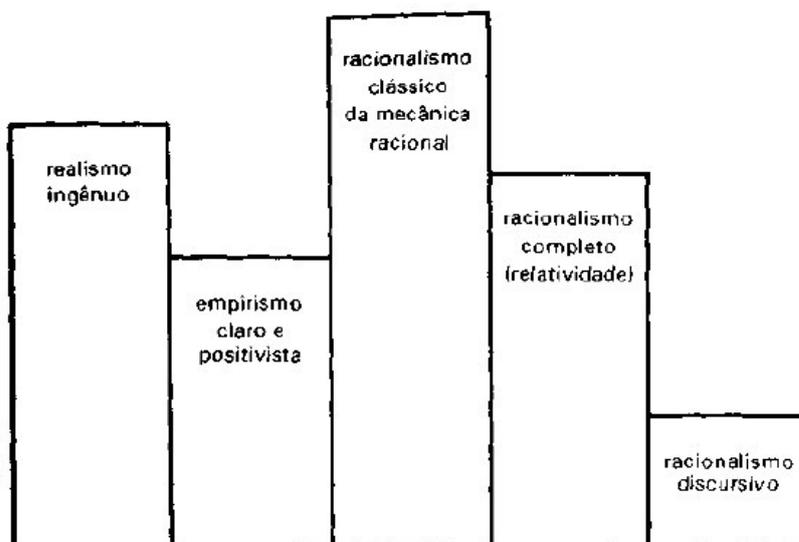
Para melhor compreender o perfil epistemológico apresentado, Bachelard (1991) tece comentários nos quais confessa a sua cultura em relação à noção de massa. Portanto, no esquema apresentado, como já mencionado, destaca-se a noção racionalista de massa, formada através de um ensino de Física elementar com uma educação matemática clássica.

O autor ressalta que, se necessário, pode considerar essa noção no sentido da mecânica relativística ou no sentido da mecânica de Dirac, sendo essas duas orientações mais penosas. Bachelard (1991) chama a atenção ao fato do comodismo, isto é, se o sujeito não se acautelar, ele será tomado pela tendência simplesmente racional, pois o racionalismo simples impõe resistência ao racionalismo completo e, sobretudo, ao racionalismo dialético. Este é um exemplo de como as filosofias “clássicas”, como o racionalismo newtoniano e kantiano podem, em determinadas situações, constituir um obstáculo ao progresso da cultura.

Considera-se, em seguida, a sua noção mais “pobre” da cultura, a noção de massa sob a sua forma empírica. Conduzida pela utilização da balança como instrumento de medida, prática bastante operada no passado, tanto na Química, nas estações de correios e nos setores de finanças, com o moedeiro pesando suas moedas em vez de contá-las. Concluindo seus comentários, Bachelard (1991) expõe as suas horas de realismo, mesmo para um conceito elaborado como é o da massa, como, por exemplo, a confusão, muitas vezes apresentada nessa etapa, da relação entre tamanho e massa de algum objeto.

Para tornar mais claro o seu método, Bachelard (1991) apresenta também o gráfico do seu perfil epistemológico a respeito de um conceito de mesmo gênero ao de massa, a noção de energia.

Figura 6 - Perfil epistemológico da noção pessoal de energia.



Fonte: Bachelard, 1991, p. 27.

Nota-se uma diferença evidente entre os perfis epistemológicos relacionados à noção de massa e energia, ainda que o sujeito seja o mesmo. No entanto, no que se refere às suas partes racionalistas, tanto na formação newtoniana como na formação relativista, os dois perfis são semelhantes.

Sobre o segundo perfil, se comparado ao primeiro, a porção empírica é menos frequente, devido ao fato da conduta do dinamômetro não ser entendida e interpretada usualmente (“sem pensar”) quando comparada, por exemplo, com a conduta da balança. De acordo com Bachelard (1991), indica-se maior importância para o conceito dialetizado de energia do que para o conceito de massa. Um conhecimento confuso da energia é notório e inspirado de acordo com o autor, pelo realismo primitivo. Em vista disso, o autor aponta que “seria interessante circunscrever bem esse conceito de energia triunfante. Ver-se-ia que ele dá a determinados pensamentos uma segurança, uma certeza, um sabor que enganam acerca da sua verdade” (BACHELARD, 1991, p. 28).

A construção de gráficos como os mostrados acima pode fornecer um modelo de análise filosófica espectral, permitindo determinar a maneira como as diversas filosofias (tanto explícita como implicitamente) relacionam-se com um conceito estabelecido. Sendo assim, esse perfil epistemológico “[...] deve sempre referir-se a um conceito designado, de ele apenas ser válido para um espírito particular que se examina num estádio particular da sua cultura” (BACHELARD, 1991, p.25). Percebe-se, então, que não se pode fixar um conceito a

uma filosofia, mas, sim, numa diversidade de aspectos filosóficos que definem uma evolução temporal do conceito. De acordo com Bachelard (1991, p. 66), “Cada filosofia fornece apenas uma banda do espectro nocional, e é necessário agrupar todas as filosofias para termos o espectro nocional completo de um conhecimento particular”.

Através deste cenário, acentua-se a pluralidade filosófica na postura epistemológica do sujeito em sua prática científica

[...] a qualquer atitude filosófica geral, pode opor-se, como objeção, uma noção particular cujo perfil epistemológico revela um pluralismo filosófico. Uma só filosofia é, pois, insuficiente para dar conta de um conhecimento preciso. Se então se quiser fazer, a diferentes espíritos, exatamente a mesma pergunta a propósito de um mesmo conhecimento, ver-se-á aumentar singularmente o pluralismo filosófico da noção (BACHELARD, 1991, p. 29).

Fazendo uso das ideias de Bachelard a respeito do perfil epistemológico do sujeito, pretende-se, neste trabalho, investigar as correntes filosóficas dos estudantes em relação ao conceito do comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética, após os mesmos realizarem atividades utilizando ferramentas hiperculturais.

Ao apresentar os gráficos para seu perfil epistemológico acerca do conceito de massa e de energia, Bachelard não explica como obteve os valores para a frequência de utilização pessoal de cada noção. Apenas aponta a dificuldade de estabelecer estes valores, ao citar que:

[...] tentaremos então pôr grosseiramente em evidência a sua importância relativa colocando em abscissas as filosofias sucessivas e em ordenadas um valor que - se pudesse ser exato - mediria a frequência de utilização efetiva da noção, a importância relativa de nossas convicções. Com uma certa reserva relativamente a esta medida muito grosseira, obtemos então o nosso perfil epistemológico (BACHELARD, 1991, p.25).

No capítulo 5 e 6, serão tratados os instrumentos e métodos utilizados por esta pesquisa para verificar as filosofias expressadas pelos estudantes ao responderem questionamentos relacionados aos fenômenos envolvendo a dualidade onda-partícula.

### **3.2.1 A relação entre as visões filosóficas e suas noções acerca da dualidade.**

Bachelard (1991) relacionou as suas interpretações privadas acerca dos conceitos de massa e energia com as visões filosóficas pertinentes e responsáveis por conduzir determinadas compreensões. Através dessa ideia, pretende-se, aqui, traçar uma relação entre as noções construídas ao longo da história acerca da dualidade e as visões filosóficas que são

responsáveis pela estruturação do perfil epistemológico do indivíduo. Esta correspondência é sugerida por Pinto e Zanetic (1999) em meio as suas investigações sobre a inserção da FQ no Ensino Médio, na qual utilizam a ideia de Perfil Epistemológico como referencial filosófico.

Desta forma, as filosofias que serão adotadas e vinculadas com as noções acerca da natureza da luz estão descritas a seguir.

### **Realismo Ingênuo**

Também pode ser denominado como Animismo, sendo considerado por Bachelard (1991) um pensamento mais primitivo do indivíduo, o qual antecede o estágio científico da noção sobre determinados conceitos e fenômenos. A percepção de que a luz seria propriedade dos olhos e a concepção aristotélica de que a luz era resultado da atividade de um determinado meio, cuja vibração provocaria o movimento de humores presentes nos olhos, integram-se na filosofia animista (ROCHA, 2002). Demais interpretações oriundas de meios não empíricos ou teóricos de entender a natureza da luz incorporam-se nessa visão filosófica. Também se encaixam nessa filosofia as representações animistas para os objetos quânticos, onde são atribuídos formatos geométricos com características visuais e de natureza tácita.

### **Empirismo claro e positivista**

Assume-se empirismo claro e positivista como a visão que trata as noções explicadas por meio de fatos empíricos, em cujas observações dos feixes de luz em determinadas situações são as principais investigações na construção do conceito sobre a natureza da luz. Por exemplo, a observação de feixes de luz ao atravessarem fendas de uma janela ou em qualquer outro objeto. Dessa forma, também atrelam-se a esse conceito interpretações acreditando na percepção sensorial defendida pelos atomistas, na qual os objetos emitiam átomos que atingiam os órgãos da visão para formar a imagem no cérebro. Sendo assim, “um pensamento empírico associado a uma experiência tão peremptória, tão simples, recebe então o nome de pensamento realista” (BACHELARD, 1991, p.15), fundamentado empiricamente, o que o difere do realismo ingênuo.

## Racionalismo Clássico

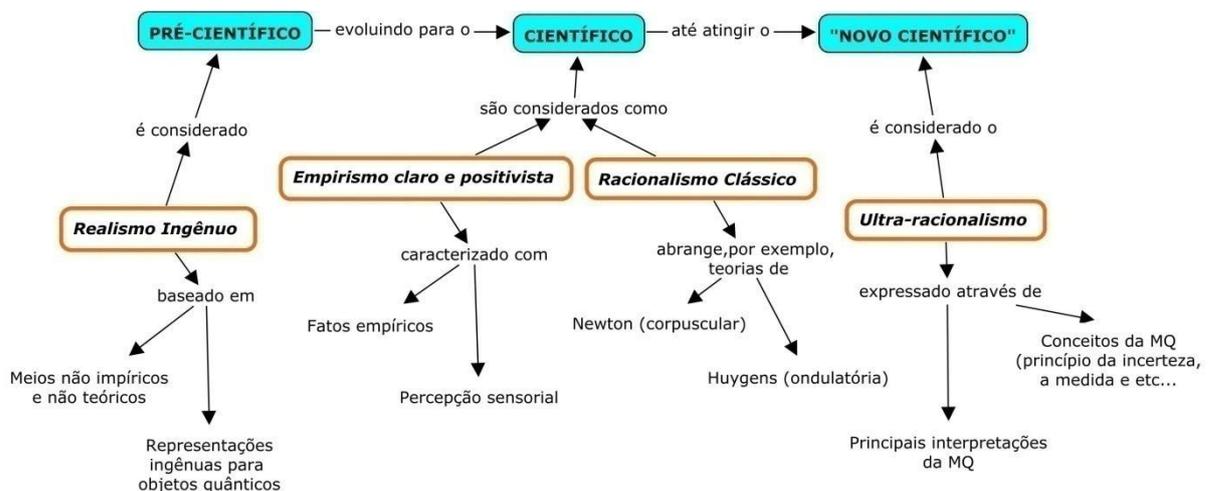
Para a visão racional, é tomado como referência a categorização apresentada por Pinto e Zanetic (1999), na qual adotam para esta filosofia modelos com fundamentação teórico-matemática, a exemplo do modelo corpuscular de Newton e o ondulatório de Huygens.

## Ultra-racionalismo

Optou-se por utilizar o ultra-racionalismo, sendo essa a visão filosófica que agrupa o racionalismo completo e racionalismo discursivo adotados por Bachelard (1991). Trata-se de um pensamento mais sofisticado, ou seja, é a evolução filosófica de um conhecimento científico particular, seguindo um caminho que se inicia no animismo e tem o ultra-racionalismo como ponto de chegada. De acordo com Bachelard (1991), esse aspecto filosófico do conhecimento físico constitui a essência do novo espírito científico, permitindo, através do seu estudo, “captar o pensamento científico contemporâneo e mostrar a novidade essencial que lhe é própria” (BACHELARD, 1991, p. 97).

Para o ultra-racionalismo, é concebida toda a explicação que faz menção às interpretações modernas da FQ para a natureza da luz. Atribui-se, por exemplo, a visão ondulatória de Schrödinger a corpuscular de Landé, a dualista realista de De Broglie e Bohm e a dualista positivista de Bohr.

Figura 7 - As visões filosóficas e suas noções acerca da dualidade.



Fonte: A pesquisa.

É importante ressaltar que, de acordo com Bachelard (1991), um conhecimento específico pode expor-se numa filosofia particular, mas não pode fundar-se numa única filosofia, o seu progresso implica aspectos filosóficos variados.

### 3.3 A NOÇÃO DE OBSTÁCULO EPISTEMOLÓGICO

No Ensino de Ciências, é comum o uso de estratégias em sala de aula, como, por exemplo, o emprego de analogias, imagens, metáforas e diversos outros modelos presentes nos materiais didáticos com o objetivo de facilitar a aprendizagem. Ainda que empregadas com a intenção de potencializar a compreensão de um determinado assunto, tais metodologias didáticas merecem investigação e reflexão quanto à sua aplicabilidade. Esses artifícios pedagógicos podem, quando não empregados corretamente, substituir linhas de raciocínio por resultados pré-estabelecidos, o que, por um lado, traz atrativos e interesse, já por outro, engessa intuições e interpretações dos alunos.

De acordo com Bachelard (1996), o indivíduo nunca é jovem intelectualmente quando lhe é apresentado o conhecimento científico, isto é, o sujeito carrega consigo uma bagagem importante de conhecimento, sendo que, no momento em que acresce à Ciência, renova-se e passa a aceitar uma mutação que contradiz o seu passado. Essa mudança de opinião/pensamento sofre resistência, uma vez que “nosso espírito tem a tendência irresistível de considerar como mais clara a idéia que costuma utilizar com frequência” (BERGSON apud BACHELARD, 1996, p. 19). Quando no processo de conhecimento o indivíduo acomoda-se com o que já sabe, o conhecimento não científico passa, então, a ser um obstáculo epistemológico ao conhecimento científico.

Conforme as ideias de Bachelard (1996), para o espírito científico todo o conhecimento é a resposta para uma pergunta, portanto, a ausência de pergunta acarreta na não construção de conhecimento. Um obstáculo epistemológico se conecta ao conhecimento não questionado. Chega o momento em que o espírito prefere o que confirma seu saber àquilo que o contradiz, em que gosta mais de respostas do que de perguntas. O instinto conservativo passa, então, a dominar e cessa o crescimento espiritual.

Um exemplo de obstáculo epistemológico na TQ é a concepção dos estudantes quanto à natureza/comportamento do elétron, onde ocorre a resistência em interpretar e analisar o comportamento ondulatório desse objeto quântico quando observado no aparato experimental da dupla fenda, por exemplo. Tendo em vista, portanto, que, ao longo de toda sua formação e principalmente nas disciplinas básicas relacionadas à química, o elétron é sempre mencionado

e estudado somente como uma partícula. Essa concepção corpuscular se comporta como obstáculo para a alternância da sua compreensão, não permitindo que o indivíduo consiga interpretar o elétron com comportamento ondulatório em determinadas situações experimentais e teóricas.

### 3.4 A VISÃO DE IMAGENS MENTAIS ASSUMIDA

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, 1991).

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). Moreira (1996) aborda duas correntes de interpretações para as imagens mentais: as representações analógicas e as representações proposicionais. Ambas as correntes buscam apresentar respostas para os questionamentos referentes à forma como o conhecimento é alcançado, processado e utilizado de forma posterior.

Essas representações, a analógica e proposicional, diferenciam-se conforme Moreira (1996):

As representações analógicas são não-discretas (não-individuais), concretas (representam entidades específicas do mundo exterior), organizadas por regras frouxas de combinação e específicas à modalidade através da qual a informação foi originalmente encontrada (MOREIRA, 1996, p.195).

As representações proposicionais são discretas (individuais), abstratas, organizadas segundo regras rígidas e captam o conteúdo ideacional da mente independente da modalidade original na qual a informação foi encontrada, em qualquer língua e através de qualquer dos sentidos (MOREIRA, 1996, p.195).

Alguns defensores do imagismo, como Bugelski (1970), Kosslyn (1980), Paivio (1990) e Otero (1999, 2002 e 2004), consideram que as imagens mentais desempenham papel central na cognição, codificando conhecimento em formato icônico, como esquemas ou mapas cognitivos, cuja característica principal é referir-se a uma estrutura mental espacial. No entanto, Anderson (1978), Moran (1973) e Pylyshyn (1973) defendem os modelos simbólicos e proposicionais, pois consideram que as imagens do ambiente não são realmente

armazenadas de forma visual icônica, e, sim, numa forma básica de símbolos digitais elementares associados em redes, por meio de regras combinatórias (WOLFF, 2015).

Com tudo, Lagreca (1997) julga a semelhança entre as duas correntes, seguindo a ideia de que uma possui potencial em transforma-se na outra, até mesmo de maneira facilitada. Essa visão conduziu os teóricos para a não solução de tal “polêmica”. Neste tocante, Anderson (1978) salienta que uma teoria baseada em imagens mentais pode ser imitada por outra baseada em proposições.

Diante da polêmica entre as questões de imagens versus proposições, existe uma opção que seria uma síntese, uma terceira opção no construto representacional, denominado de Modelos Mentais de Johnson-Laird.

Segundo Moreira (1996):

Para ele (Johnson-Laird), proposições são representações de significados, totalmente abstraídas, que são verbalmente expressáveis. O critério de expressabilidade verbal distingue Johnson-Laird de outros psicólogos cognitivos. Imagens são representações bastante específicas que retêm muitos dos aspectos perceptivos de determinados objetos ou eventos, vistos de um ângulo particular, com detalhes de uma certa instância do objeto ou evento. Modelos mentais são representações analógicas, um tanto quanto abstraídas, de conceitos, objetos ou eventos que são espacial e temporalmente análogos a impressões sensoriais, mas que podem ser vistos de qualquer ângulo (e aí temos imagens!) e que, em geral, não retêm aspectos distintivos de uma dada instância de um objeto ou evento (MOREIRA, 1996, p.196).

Nesta pesquisa, objetiva-se a identificação de imagens mentais utilizadas pelos estudantes para responder alguns questionamentos após o uso de ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais. Portanto, considera-se que tais imagens são expressadas a partir do acesso à informação visual armazenada na memória do estudante. Para tanto, assume-se 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.

Essa visão também é adotada por Wolff (2015), em sua pesquisa de doutoramento, na qual acrescenta que a imagem mental não será uma cópia da percepção visual de objetos externos, mas resultado do processo interpretativo do estudante, onde o resultado depende também do seu conhecimento.

A seguir, será apresentado o capítulo teórico envolvendo os conceitos fundamentais do fenômeno da dualidade onda-partícula e as suas conexões com os *softwares*, em forma de bancada virtual, utilizados por esta pesquisa.

## **CAPÍTULO 4 – A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA**

Neste capítulo, será abordado o tema da dualidade onda-partícula, bem como as principais interpretações responsáveis por compreender esse fenômeno. Inicialmente, serão apresentadas algumas informações de cunho histórico, que em geral estão expostas em livros didáticos utilizados nos cursos de licenciatura em física e, em seguida, tratar-se-á dos principais conceitos da dualidade e os últimos desdobramentos acerca do tema. Para finalizar o capítulo, serão apresentados os arranjos experimentais virtuais utilizados como proposta para as atividades desta pesquisa, os seus regimes clássicos e quânticos serão retratados e explicados com o objetivo de esclarecer as dúvidas mais frequentes dos estudantes, apontadas em diversos trabalhos de pesquisa citados ao longo desta dissertação. Será dada maior ênfase conceitual ao longo deste capítulo, utilizando os procedimentos matemáticos básicos necessários.

### **4.1 UMA REVISÃO DE INFORMAÇÕES DE CUNHO HISTÓRICO, FREQUENTEMENTE DISCUTIDAS EM SALA DE AULA, A RESPEITO DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA.**

Nesta seção pretende-se apresentar, buscando respeitar uma ordem cronológica, algumas informações de cunho histórico que geralmente são abordados com maior frequência ao longo dos cursos de Licenciatura em Física. O objetivo não é versar a história da luz e da dualidade, mas sim situar o leitor diante de episódios considerados importantes nos desdobramentos dos estudos acerca do comportamento dual da matéria e principalmente da radiação eletromagnética.

A “luz” como objeto de estudo se faz continuamente presente nas pesquisas científicas. Desde a antiguidade, existem relatos sobre reflexão, refração, visão, utilização de espelhos e lentes, propagação, velocidade, origem e natureza. No entanto, os debates instaurados que originaram maiores controvérsias foram sobre a natureza e a velocidade da luz, fazendo com que a polêmica sobre a natureza ondulatória ou corpuscular da radiação (luz) fosse constantemente mantida.

Pode-se considerar que as primeiras observações se deram por conta dos gregos, que já iniciavam os estudos sobre a visão e a tentativa de explicar o que seria a luz. Entre as

observações gregas, as concepções que mais se destacaram foram as de Leucipo (480-420 a.C) e Demócrito (460-370 a.C), pois ambos entendiam que a luz era formada por átomos arredondados que se deslocavam no vácuo com alta velocidade. Tanto Demócrito como os atomistas da época detinham um pensamento de percepção sensorial em que os objetos emitiam átomos que atingiam os órgãos da visão para formar a imagem no cérebro (GARCÍA et al., 2007).

Tais observações despertaram interesse do grande filósofo grego Aristóteles (384-322 a.C), que desenvolveu estudos adversos à teoria anteriormente apresentada. Ele foi um dos primeiros a tentar dar uma explicação não corpuscular para a natureza da luz, buscando o entendimento da natureza vibratória do som, também tentou encontrar uma resposta para a natureza da luz. Para ele, a luz era resultado da atividade de um determinado meio, cuja vibração provocaria o movimento de humores presentes nos olhos (ROCHA, 2002).

Durante toda a Idade Média, as observações referentes à luz e à Ciência, em geral, se mantiveram, de certa maneira, ocultas. Com a Revolução Científica, por volta do século XVII, a teoria de Aristóteles relativa à natureza da luz foi retomada e fortemente criticada. Dois novos modelos surgiram no século XVII: o primeiro defendendo e favorecendo o comportamento corpuscular, que estava associado ao nome de Isaac Newton, o qual acreditava que a luz fosse composta por minúsculas partículas (corpúsculos); enquanto o segundo defendia o comportamento ondulatório que estava atrelado a nomes como os de Christiaan Huygens, Robert Hooke, René Descartes e Thomas Young.

Por volta dos anos de 1665, um fenômeno interessante surge em um experimento realizado pelo físico e matemático Francesco Maria Grimaldi. Segundo Zilio (2009), Grimaldi observou faixas claras e escuras de luz na sombra de um bastão iluminado por uma pequena fonte. Ele havia descoberto o fenômeno da difração, levando-o a uma concepção ondulatória da luz.

Por outro lado, segundo Silva e Martins (2006), Newton apresentou à Royal Society, por volta de 1672, um estudo sobre a dispersão da luz, baseado em experimentos feitos com prismas. Pela ausência de explicação plausível para a existência de sombra geométrica e também por ser um atomista, propôs um modelo corpuscular para a luz. Newton também declarou que a luz branca era composta de uma mistura de várias cores, as quais correspondiam a uma variedade de partículas, cada partícula correspondente a uma dada cor.

Robert Hooke fez várias críticas aos trabalhos iniciais de Newton sobre a óptica. Ele era contrário à natureza corpuscular da luz e, em uma de suas frases citadas por Silva (2009, p.281), Hooke afirma que “a luz é produzida por vibrações de um meio sutil e homogêneo e

este movimento se propaga por impulso ou ondas simples e de forma perpendicular à linha de propagação”.

Aquém dessa “discussão” entre Newton e Hooke, o físico e matemático de origem neerlandesa Christiaan Huygens aperfeiçoava seus estudos sobre a luz. Segundo Silva (2009), Huygens, baseando-se em analogias com o som, formulou uma hipótese não material na explicação da natureza da luz, publicada na obra: *Tratado Sobre a Luz*, em 1678. Silva (2009) apresenta uma passagem da obra de Huygens, na qual ele afirma:

[...] Sabemos que, por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável o som se propaga em toda a volta do lugar onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte do ar a outra. A propagação desse movimento se faz com igual velocidade para todos os lados e devem se formar como superfícies esféricas que crescem e que chegam a atingir nossas orelhas. Ora, não há dúvida de que a luz também não venha do corpo luminoso até nós por algum movimento impresso à matéria que está entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passe de um até o outro (HUYGENS apud SILVA, 2009, p.282).

Huygens desenvolveu estudos a respeito da construção geométrica da propagação ondulatória o que veio a ser didatizado como “Princípio de Huygens” que de maneira simplificada pode ser expressado como uma proposta de representação de frentes de ondas, onde cada ponto de uma frente de onda a cada instante do tempo, se comporta como uma nova fonte de ondas elementares que se propagam para além da região já atingida pela onda original e com a mesma frequência que ela (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2010). Assim, de acordo com esse princípio pode-se concluir que, a frente de onda se propaga mantendo suas características quando está em um meio homogêneo e isotrópico desde que não haja obstáculos.

Quando a luz encontra um obstáculo com ordem de grandeza semelhante a seu comprimento de onda, interage com esse obstáculo causando o fenômeno da difração, que não podia ser explicado somente com as ideias de Huygens. Para isso, o físico francês Augustin-Jean Fresnel arbitrou conceitos sobre a fase e a amplitude das ondas secundárias, acrescentando desta forma fatores que, combinados, explicam tanto as características da propagação linear da luz, como as ocorridas em função da luz como onda (KRAPAS; QUEIROZ; UZÊDA, 2010).

Vê-se que o posicionamento de Huygens é contrário às ideias da natureza corpuscular da luz de Newton. O conceito de corpúsculo, ou partícula, é completamente diferente do conceito de onda, as divergências das ideias se devem às diferenças entre as características

básicas das duas abordagens. Uma partícula clássica possui matéria, uma onda não; uma partícula pode se locomover no vácuo, uma onda necessita de um meio para se propagar (esse era o pensamento da época); uma onda pode contornar obstáculos, uma partícula não. Enfim, para a Física Clássica, a luz era uma coisa ou outra, e seria necessário escolher um dos modelos.

Segundo Salvetti (2008), o modelo de Newton prevaleceu sobre o de Huygens por muitos anos, pois sua explicação sobre as cores da luz era consistente e Newton era mais reconhecido pela comunidade científica, favorecendo-o na escolha do “melhor” modelo.

Thomas Young nasceu na Inglaterra, no ano de 1773, e era um cientista controverso às ideias da natureza corpuscular da luz. Tanto que, por volta do ano de 1802, ele montou um arranjo experimental - interferência em dupla fenda - que comprovou a natureza ondulatória da luz. Segundo Pessoa Jr (2006), Young considerou que, se a luz fossem ondas, elas poderiam, assim como as ondas do mar, as ondas sonoras e todos os outros tipos de ondas, anularem-se umas as outras, ou intensificarem-se.

As ideias de Huygens e Young foram retomadas em 1818 por Augustin Jean Fresnel, o qual foi capaz de dar uma formulação matemática ao fenômeno de difração. Na apresentação de Fresnel de seu artigo para um comitê premiado da Academia Francesa de Ciências, sua teoria foi fortemente criticada pelo célebre matemático francês S. Poisson, um membro do comitê. Poisson detectou uma possível falha da teoria de Fresnel, demonstrando que ela previa uma mancha clara no centro da sombra de um disco opaco. No entanto, François Arago executou um experimento em que foi detectada a tal mancha. Com isso, Fresnel ganhou o prêmio, e, desde então, o efeito tem sido conhecido como a Mancha de Poisson (MAGALHÃES, 2005, p. 8).

Ainda no Século XVIII, Michael Faraday, um cientista bastante dedicado à experimentação, verificou que o efeito do campo magnético no meio material era capaz de rotacionar o plano de polarização da luz (Efeito Faraday) (DIAS; MARTINS, 2004). Conhecendo tais desdobramentos James Clerk Maxwell alertou-se, então, sobre a relação entre a luz e os fenômenos eletromagnéticos.

No eletromagnetismo, Maxwell reuniu e organizou todo o conhecimento científico adquirido até a sua época, além de dar a sua própria contribuição científica. Todas as conclusões foram fundamentadas num simples conjunto de quatro leis, conhecidas, atualmente, como as “Equações de Maxwell”. De acordo com Feynman, Leighton e Sands (2008), essas equações não só fundamentaram a existência de ondas eletromagnéticas, como permitiram determinar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo (ou

num meio qualquer), cujo valor coincidiu com a velocidade da luz no vácuo. Esse resultado corroborou a ideia de que a luz é uma onda eletromagnética, unificando óptica com o eletromagnetismo.

Maxwell não produziu ondas eletromagnéticas experimentalmente, mas previu sua criação, o que de fato ocorreu poucos anos depois de sua morte. Em 1887, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu produzir e detectar as primeiras ondas eletromagnéticas geradas em laboratório. Hertz descobriu que uma faísca produzida entre os terminais de uma bobina fazia aparecer outra faísca nos terminais de outra bobina próxima. Com isso, ele concluiu que as faíscas originavam campos eletromagnéticos variáveis que se propagavam pelo espaço - eram as ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2008).

Em 1888, Hertz já conseguia gerar ondas eletromagnéticas de frequência da ordem de  $10^9$  Hz, e detectá-las a 20 metros da fonte, além de conseguir comprovar as propriedades ondulatórias dessa perturbação. De acordo com Tipler e Llewellyn (2006), Hertz em seu famoso experimento, no qual produziu e detectou ondas eletromagnéticas, observou também o comportamento corpuscular da luz - um fenômeno que mais tarde seria conhecido por efeito fotoelétrico.

Hertz, que estava usando um circuito sintonizado com um centelhador para gerar as ondas e um circuito semelhante para detectá-las, observou, acidentalmente, que, quando a luz proveniente do centelhador do transmissor deixava de incidir no centelhador do receptor, era necessário reduzir a distância entre os eletrodos do segundo centelhador para continuar recebendo os sinais. A luz facilitava, portanto, a produção de centelhas (TIPLER; LLEWELLYN, 2006, p.87).

A descoberta inesperada do efeito fotoelétrico forçou Hertz a desviar-se de sua pesquisa principal, passando a analisar o novo fenômeno com maior precisão. Seus resultados, após serem publicados, foram complementados por outros pesquisadores. Descobriu-se, portanto, que partículas carregadas são emitidas, em certas condições, quando uma superfície metálica é exposta à luz.

De acordo com Salvetti (2008), com a morte prematura de Hertz, seu auxiliar Philip Lenard identificou a incidência de radiação ultravioleta, juntamente com as faíscas. Logo, decidiu montar um experimento para verificar o fenômeno e, através do mesmo, percebeu que a luz arrancava cargas elétricas de uma placa emissora. Em 1900, Lenard submeteu as partículas emitidas das superfícies metálicas a um campo magnético, e verificou que as partículas emitidas eram elétrons. A emissão de elétrons de uma superfície, devida à

incidência de luz sobre essa superfície, é chamada efeito fotoelétrico (EISBERG; RESNICK, 1979, p. 51).

Em 1905, o físico alemão Albert Einstein apresentou uma proposta para a explicação do efeito fotoelétrico que o rendeu, em 1921, o prêmio Nobel de Física. Baseando-se nos estudos do também físico alemão Max Planck, ele propôs que a quantização da energia usada no problema do corpo negro fosse uma característica universal da luz. A luz não estaria distribuída uniformemente no espaço no qual se propaga, mas sim constituída por “pacotes” de energia bem definida, denominados quanta. A energia de cada “pacote” é dada por  $h\nu$ , onde  $h$  é a constante de Planck e  $\nu$  é a frequência da luz incidente. Mais tarde, os quantas de energia foram denominados fótons (PESSOA JR, 2006).

Einstein supôs que no processo fotoelétrico um fóton é completamente absorvido por um elétron. Em decorrência disso, Einstein substituiu o “ou”, de onda ou partícula, pelo “e”, de onda e partícula para a natureza da luz, pois os experimentos que comprovavam a sua natureza ondulatória não descartavam a natureza corpuscular da luz. Mas como é possível considerar que um objeto se comporte ao mesmo tempo como onda e partícula? Uma onda é uma entidade espalhada no espaço e que pode ser dividida em quantas partes se queira. Já, uma partícula, é pontual, possui localização definida e indivisível, até certo limiar de energia. Portanto, seria uma contradição lógica afirmar que a luz é onda e partícula. Como esse problema conceitual pode ser resolvido?

Somente com o advento da Mecânica Quântica (início do Século XX) uma visão mais completa a respeito da natureza dual da luz pode ser obtida, uma vez que não é possível estabelecer sua natureza ondulatória simultaneamente à corpuscular. Por isso, hoje, entende-se a natureza da luz como uma dualidade onda-partícula, opostos que se complementam. “Na verdade, nossa imagem da propagação espacialmente contínua da luz e a atomicidade dos efeitos luminosos são aspectos complementares, no sentido de descreverem características igualmente importantes dos fenômenos luminosos” (BOHR apud CARVALHO, 2005, p. 14). Em suma, na segunda década deste século, não havia razão para duvidar do caráter dualístico da radiação: ora ondulatório, ora corpuscular.

“O formalismo da Teoria Quântica fornece apenas previsões para resultados de medições, tipicamente probabilidades de se encontrarem quanta em diferentes posições. Mas ele se cala sobre o que acontece por trás das aparências” (PESSOA JR, 2006, p. 90). Para tentar “explicar” o problema conceitual apresentado acima, o autor sugere a necessidade de fornecer uma interpretação da TQ.

## 4.2 A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

A dualidade onda-partícula é um fenômeno absolutamente impossível de se explicar classicamente, e contém em si o coração da FQ (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2008). 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, na qual desconsideravam a concepção ondulatória da luz, até então consolidada e corroborada pelo eletromagnetismo de Maxwell. Diante deste 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 - e reduzindo 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 (1905), que, baseando-se no trabalho de Planck (1900), definiu a energia de cada fóton detectado, e esta é dada pela equação  $E = h\nu$ , onde  $\nu$  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  $\lambda$  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  $\psi$ , 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  $\psi$  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 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 da luz, na qual estão enraizados quase todos os problemas filosóficos e epistemológicos relacionados à TQ.

### 4.2.1 A dualidade nos dias de hoje

Já é conhecido que a luz comporta-se como onda e também como partícula. Ainda assim, de acordo com o princípio da complementaridade de Bohr, ambos os comportamentos não são observados ao mesmo tempo. Conforme o experimento, a luz apresenta natureza ondulatória ou corpuscular. No entanto, Menzel et al. (2012) divulgaram em seu trabalho um resultado importante no contexto da dualidade onda-partícula. Os autores utilizaram a experiência da dupla fenda de Young com fótons emaranhados, em posição e momentos gerados através do “*spontaneous parametric down conversion*” (SPDC), medindo, assim, tanto um padrão de interferência com grande visibilidade quanto uma alta informação a respeito do caminho tomado pelos fótons, numa única configuração/arranjo experimental. Isto é, foi possível observar, simultaneamente, características ondulatórias e corpusculares de um sistema quântico.

Motivados por este trabalho, Bolduc et al. (2014) realizaram um estudo para verificar o método e os resultados apresentados por Menzel et al. (2012), e, assim, uma falha foi apontada. Segundo os autores, Menzel et al. (2012) violaram a regra chamada de “amostragem justa” (tradução nossa do termo em inglês “*fair sampling*”). Isto quer dizer que as medidas realizadas no arranjo experimental tinham diferentes precisões no momento de obter as informações sobre o caminho percorrido pelo fóton e a visibilidade das franjas de interferência. Bolduc et al. (2014) ainda reforçam que amostras tendenciosas podem causar uma aparente violação no princípio da complementaridade na dualidade. Em suas conclusões, afirmam: “De acordo com a nossa análise o princípio da dualidade em sua forma padrão está sã e salvo” (BOLDUC et al., 2014, p. 12340, tradução nossa).

Neste tocante, o trabalho de Piazza et al. (2015), publicado recentemente na conceituada revista *Nature Communications*, apresenta resultados considerados inéditos pelos próprios autores. O grupo de pesquisadores conseguiu observar e fotografar pela primeira vez um quantum de dualidade onda-partícula da luz (*quantum wave-particle duality of light*). Os autores obtiveram uma onda estacionária de luz após a grande exposição de um metal com uma radiação ultravioleta, então foram arremessados elétrons para a interação com os fótons da onda estacionária, fazendo com que as suas energias fossem alteradas. Essa interação foi observada por um microscópio de alta potência. Assim, a onda apresentou-se como uma sucessão de partículas distintas, permitindo aos pesquisadores visualizar, simultaneamente, a onda estacionária e os fótons perturbados.

Em um comunicado à imprensa<sup>9</sup>, um dos autores do trabalho, Fabrizio Carbone, da Escola Politécnica Federal de Lausanne (EPFL), na Suíça, afirmou que: “Esta experiência demonstra que, pela primeira vez, podemos filmar a mecânica quântica - e sua natureza paradoxal - diretamente”. Este estudo ajudará os pesquisadores a entenderem melhor a natureza fundamental da luz, podendo ajudar a apoiar o desenvolvimento da computação quântica e uma série de outras tecnologias.

Em termos de interpretações da MQ, de acordo com Bromberg (2011) os estudos avançam para compreender as proposições filosóficas e empíricas levantadas com o Teorema de Bell<sup>10</sup>, no qual afirma que qualquer interpretação da MQ deve abandonar ou o realismo, ou a localidade (ou os dois). Experimentos, então, passaram a ser realizados com o objetivo de verificar a violação da desigualdade de Bell. Um teste experimental publicado na *Nature* foi realizado em 2007 por Gröblacher e colaboradores, mostrando uma classe ampla de teorias realistas não locais incompatíveis com as correlações quânticas experimentalmente observáveis. O resultado tornou-se interessante, mas ainda é possível defender uma interpretação realista da teoria quântica, desde que ela seja não local (como a interpretação dualista realista).

#### 4.3 UMA INTRODUÇÃO ÀS QUATRO INTERPRETAÇÕES DA TEORIA QUÂNTICA

A TQ é considerada uma teoria robusta e de sucesso. No entanto, é uma característica notável dessa teoria o fato de ela ser interpretada de diferentes maneiras, sendo que cada uma dessas interpretações é internamente consistente e, de modo geral, consistente com os experimentos quânticos. 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

---

<sup>9</sup> Comunicado disponível em: <http://actu.epfl.ch/news/the-first-ever-photograph-of-light-as-both-a-parti/>. Acesso em: 13 Jun. 2015.

<sup>10</sup> Ao leitor que estiver interessado em uma apresentação detalhada e completa do teorema de Bell, ver Pessoa Jr (2006, caps. 27-30).

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 detalhadas as quatro interpretações selecionadas por Montenegro e Pessoa Jr (2002). Apesar dessas categorias serem oriundas deste trabalho, serão apresentadas 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, tornando-se um pacote pontual de energia, parecendo 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, 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 desta 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 sendo 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 a de 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 nos 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 (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, esta interpretação busca conciliar o fenômeno ondulatório com o fenômeno corpuscular na mesma experiência. Na visão dualista realista cada sistema quântico é descrito pelo estado  $\Psi$  e composto por estados adicionais ocultos rotulados por um parâmetro  $\lambda$  sendo este uma partícula com posição e velocidade bem determinadas (PESSOA JR, 2006). O estado  $\Psi$  seria uma onda piloto ou um campo de probabilidades que conduz a partícula, sendo que a energia está presente somente na partícula.  $\Psi$  e  $\lambda$  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 (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 quântico). 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, sendo considerado apenas como um instrumento matemático de predição e cálculo, desprovido de realidade física. Salienta-se, ainda, a existência de diversas variações dessa abordagem, estabelecendo 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, construindo, assim, uma reflexão acerca do processo de construção científica, traçando as diversas soluções e suas lacunas diante dos resultados obtidos experimentalmente.

#### 4.4 O ARRANJO EXPERIMENTAL DA DUPLA FENDA

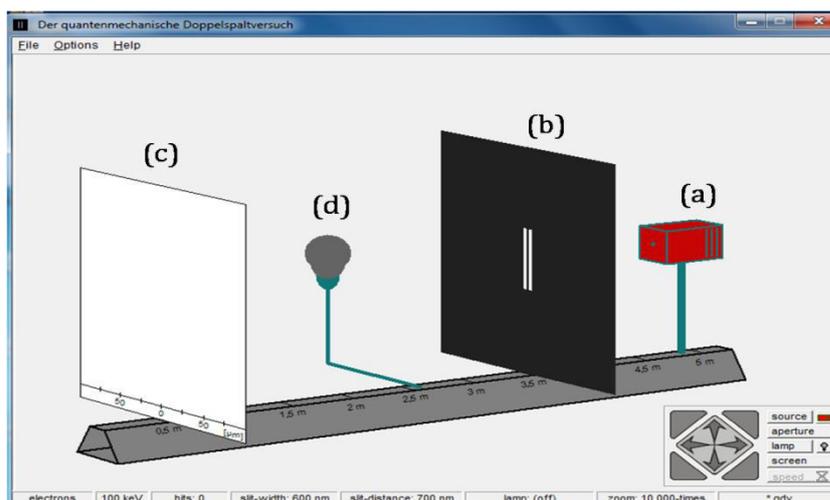
Nas seções seguintes, explica-se o experimento da Dupla Fenda de uma forma bastante didática, considerando a explicação fornecida por Feynman, Leighton e Sands (2008) como uma das mais acessíveis e didáticas possíveis, considera-se essa informação importante pelo fato do espectro de leitores dessa dissertação seja composto por licenciandos em física e professores já atuantes em turmas de ensino médio, e 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 o seria qualquer exposição deste fenômeno objetivando uma organização didática –. Para qualquer discussão adicional a respeito desse tema, recomenda-se 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, mostrando que a luz comportava-se como uma onda, porque os fenômenos da difração e da interferência, observados por Young com seu aparato experimental, eram características exclusivamente ondulatórias. A Fig. 8 apresenta o esquema da dupla fenda, utilizado durante as atividades propostas aos licenciandos em física. O mesmo foi obtido através de um *software* livre<sup>11</sup>, desenvolvido pelo *Physics Education Research Group of the University of Munich*.

---

<sup>11</sup> Disponível em [http://www.didaktik.physik.unimuenchen.de/archiv/inhalt\\_materialien/doppelspalt/index.html](http://www.didaktik.physik.unimuenchen.de/archiv/inhalt_materialien/doppelspalt/index.html). Acesso em 23 de Maio de 2015.

Figura 8 - Arranjo experimental da dupla fenda.



Fonte: Imagem extraída do *software*.

O AEDF é composto basicamente (a) por 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 visualização dos elétrons em seus percursos.

Serão apresentados dois 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, e o regime quântico com a fonte emitindo elétrons ou fótons.

#### 4.4.1 A dupla fenda em regime clássico – experiências com projéteis e ondas

Buscando entender o comportamento quântico dos elétrons e dos fótons, primeiramente serão apresentados os resultados 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. 9<sup>12</sup>. 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

<sup>12</sup> Será utilizado este modelo de arranjo experimental para explicar os fenômenos, o arranjo experimental virtual do *software* utilizado é semelhante e produz os mesmos resultados.

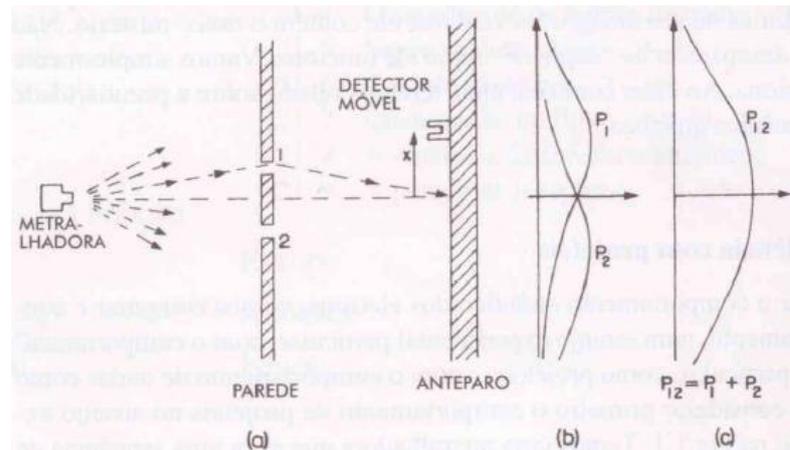
grandeza dos projéteis. Após a parede, existe o anteparo que vai detectar a posição dos projéteis que o atingirem. Com esse aparato, pode-se calcular a probabilidade de encontrar a posição  $x$  em relação ao centro do anteparo da colisão do projétil com o detector, após passar pelas fendas. Fala-se 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: 1ª- A fenda 2 sendo fechada, impedindo a passagem de projéteis por ela; 2ª- A fenda 1 sendo 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. 9. A probabilidade  $P_{12}$ , assim chamada porque os projéteis podem ter passado pela fenda 1 ou pela fenda 2, tem seu máximo no valor de  $x = 0$ .

Figura 9 - 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:

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

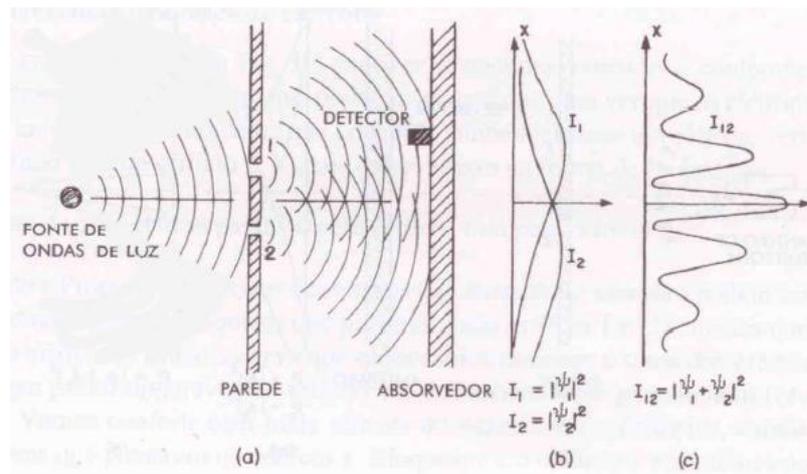
Verifica-se, portanto, que as probabilidades simplesmente se somam, o resultado com as duas fendas abertas é a soma dos resultados de cada fenda aberta separadamente. Feynman, Leighton e Sands (2008) chamam esse resultado de “observação da “não-interferência””.

Agora, será considerada uma experiência da dupla fenda com ondas coerentes de luz. O aparato experimental é mostrado no diagrama da Fig. 10 e sofre alterações quando comparado ao anterior a fonte emissora, que, em vez de lançar projéteis, passa a emitir ondas coerentes de luz. E o anteparo de detecção passa a medir a intensidade das ondas luminosas, lendo, então, em proporção à energia sendo transportada pela onda.

Ao ligar a fonte, mede-se a intensidade da onda para diversos valores de  $x$  (mantendo a fonte de ondas operando 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 10 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com ondas de luz.



Fonte: Adaptação da figura 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  $\psi_1$  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. 1.1). 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  $\phi$  é a diferença de fase entre  $\psi_1$  e  $\psi_2$ . 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  $\phi$  entre os feixes que se combinam nesse ponto, sendo

$$I \propto 4E'^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right).^{13} \quad (6)$$

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 contra-fase, 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.

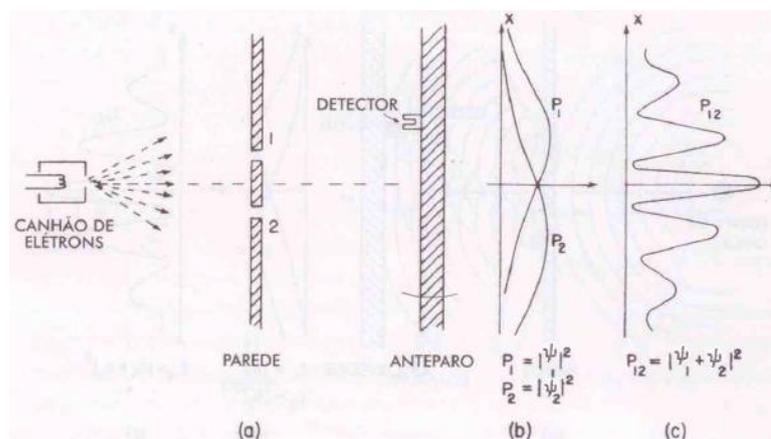
#### 4.4.2 A dupla fenda em regime quântico – uma experiência com elétrons/fótons

Agora, será analisada a experiência da fenda dupla em regime quântico, com a fonte passando a ser um canhão de elétrons. O detector presente no anteparo é sensível a ponto de medir a posição que cada elétron que se choca com o anteparo, após o mesmo 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. 11, pode-se encontrar uma resposta para a seguinte pergunta: “qual a probabilidade relativa de que um elétron chegue ao anteparo em determinada posição  $x$  em relação ao seu centro?”.

---

<sup>13</sup> Para explicações mais detalhadas em relação a equação, sugere-se a leitura do livro texto de Eisberg e Resnick, 1979.

Figura 11 - Arranjo experimental da dupla fenda, uma experiência com elétrons



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. 11. 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.

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 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. 11). 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 a seguinte conclusão: os elétrons chegam em unidades (inteiros), como as partículas, e a probabilidade de chegada desses elétrons é distribuída como

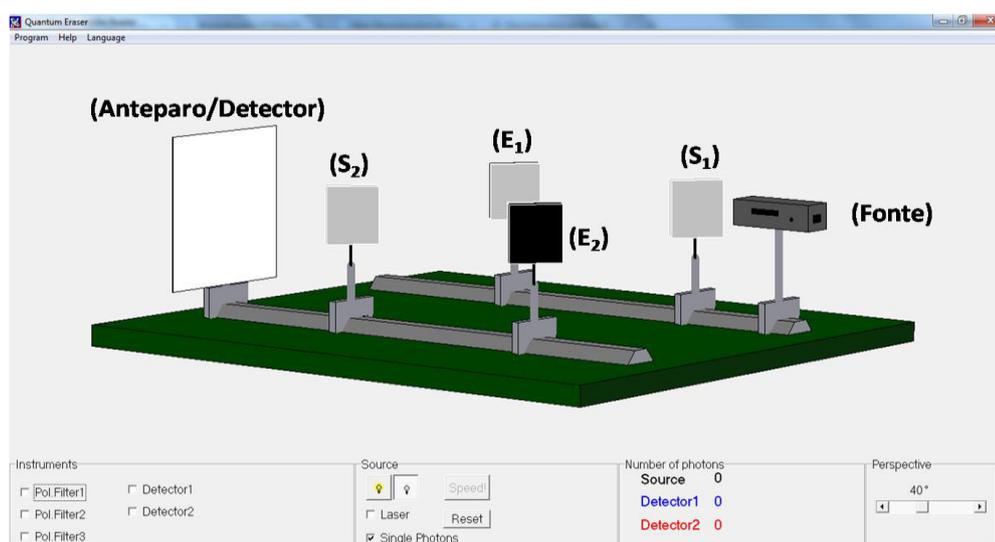
a distribuição de intensidade de uma onda (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2008). Portanto, nesse sentido, os elétrons se comportam algumas vezes como partícula e outras como onda.

#### 4.5 O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZEHNDER

Nesta seção será apresentado um arranjo experimental semelhante ao da fenda dupla, envolvendo novamente o fenômeno da interferência de ondas. O aparato em questão chama-se “interferômetro de Mach-Zehnder” (IMZ), desenvolvido no século XIX. Reforça-se 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* livre<sup>14</sup>.

O esquema do IMZ está exposto na Fig. 12, composto por dois espelhos semi-refletores ( $S_1$  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 formados após a detecção da luz incidente.

Figura 12 - Interferômetro de Mach-Zehnder.



Fonte: Imagem extraída do *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

<sup>14</sup> Disponível em <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfere.html>. Acesso em 29 de Maio de 2015.

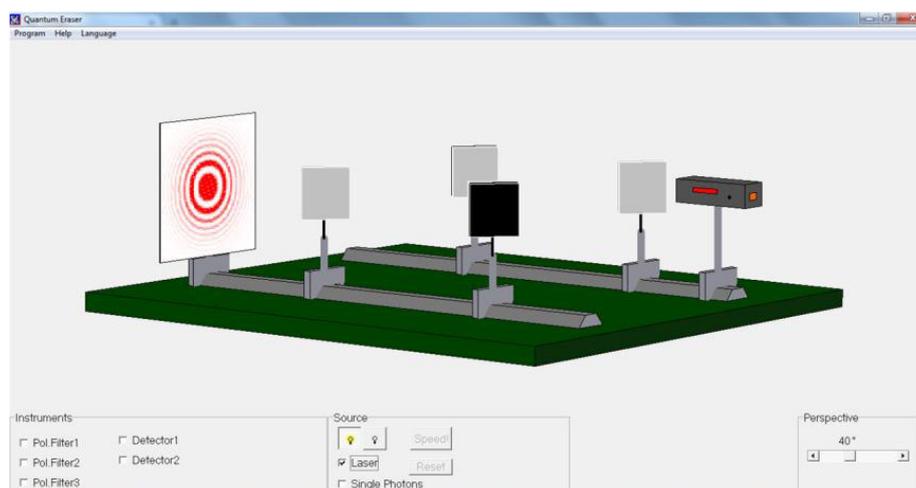
feixes seja sempre de  $45^\circ$ . Esse *software* adota uma leve diferença entre os dois braços do interferômetro, ou os dois caminhos ópticos, de forma que um padrão de anéis circulares aparece no anteparo quando a fonte emite luz laser.

Serão apresentados dois regimes importantes do IMZ: o regime clássico, explicado pela teoria ondulatória clássica e o regime quântico (monofotônico), diminuindo a intensidade do feixe emitido, a ponto de analisar fótons individuais explicado pela TQ. Essas explicações são baseadas em trabalhos de Pessoa Jr (1997), Ostermann e Prado (2005), Pessoa Jr (2006) e Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009).

#### 4.5.1 O IMZ em regime clássico – interferência de 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. 13).

Figura 13 - IMZ em regime clássico, na perspectiva de  $40^\circ$ . Há formação do padrão de interferência no anteparo.



Fonte: Extraído do *software*.

Para explicar o padrão observado no resultado da simulação, usa-se o mesmo raciocínio empregado ao analisar o experimento da dupla fenda clássico, ou seja, recorre-se 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. 6. 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.

#### 4.5.2 OIMZ em regime quântico – interferência de um fóton

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,  $\omega$  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 auto-estados do fóton no IMZ. O estado geral do fóton pode ser representado pela superposição dos auto-estados, de forma que:

$$\Psi_{(x,t)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_A + \psi_B) \quad (7)$$

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 auto-estados:

$$\psi_A = Ce^{(ikx - i\omega t)} \quad e \quad \psi_B = Ce^{(ikx - i\omega t + \phi)} \quad (8)$$

onde  $\phi$  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:

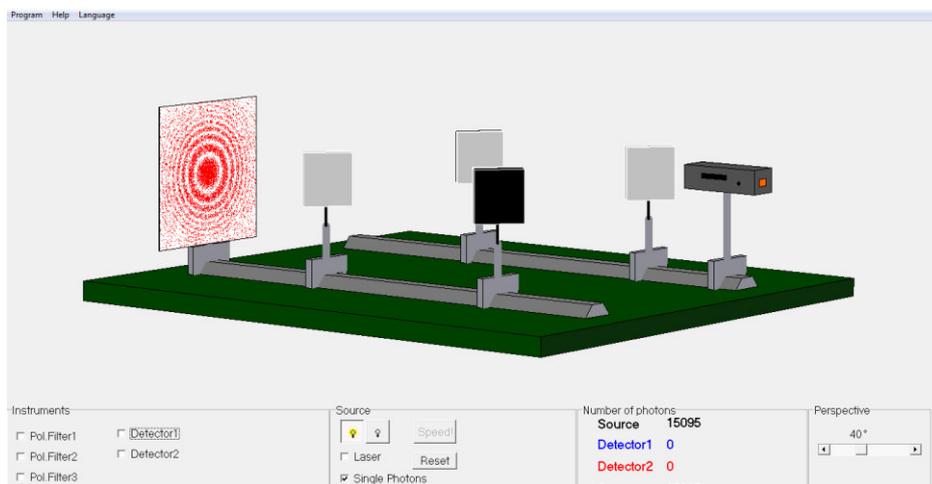
$$|\Psi_{(x,t)}|^2 = \frac{1}{2} |\psi_A + \psi_B|^2 = \frac{1}{2} |C|^2 (\psi_A^* + \psi_B^*)(\psi_A + \psi_B) \quad (9)$$

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

$$|\Psi_{(x,t)}|^2 = C^2 \cos^2(\phi/2). \quad (10)$$

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. 14, obtida após a experimentação com o *software*.

Figura 14 - IMZ em regime monofotônico. Há formação do padrão de interferência no anteparo.



Fonte: Extraído do *software*.

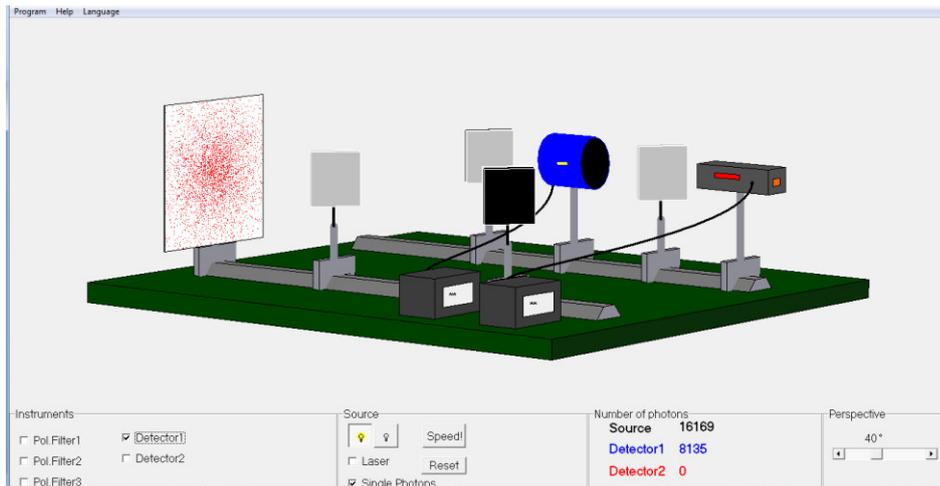
Uma diferença importante entre a mecânica clássica (MC) e a MQ trata da pré-determinação da posição do fóton, enquanto, na MC, a posição do fóton pode ser pré-determinada, se dadas as condições iniciais. A MQ não permite predição em relação à posição de apenas uma única detecção, mas, sim, uma predição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

#### *Comportamento corpuscular do fóton no IMZ em regime quântico*

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. 15, verifica-se que uma certa quantidade de fótons seguiram 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 15 - IMZ em regime monofotônico com um detector no caminho A. Não há formação de padrão de interferência no anteparo.



Fonte: Extraído do *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 auto-estados, e transforma o estado do corpúsculo em um estado localizado (OSTERMANN; PRADO, 2005, p. 199).

A seguir, será apresentada a metodologia utilizada por esta pesquisa.

## CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

Neste capítulo, será descrita a pesquisa no âmbito metodológico, a fim de justificar o conjunto de ações que fizeram parte do constructo da mesma. A estrutura desta proposta metodológica converge para caminhos que tornem possível a identificação da mudança na estrutura cognitiva dos estudantes durante a mediação hipercultural composta por *softwares* em forma de laboratórios virtuais (ou bancadas virtuais).

### 5.1 BREVE TRAJETÓRIA DO AUTOR

O autor desta pesquisa é graduado em Licenciatura em Física pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Bento Gonçalves. Ao longo da graduação, foi bolsista do Programa de Bolsa de Iniciação a Docência (PIBID) junto ao subprojeto Física, onde teve a oportunidade de manter o foco na prática docente, através de projetos planejados e executados em escolas da rede pública.

Após concluir sua formação em nível superior, o autor ingressou no mestrado acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIM), na Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), com o objetivo de qualificar sua formação acadêmica, bem como aprimorar sua prática docente, buscando como foco principal o estudo direcionado para o ensino de Física.

No PPGECIM, vinculou-se à linha de pesquisa Tecnologias de Informação e Comunicação para o Ensino de Ciências e Matemática, com o intuito de pesquisar as influências do uso de uma ferramenta computacional (hipercultural) no processo de ensino-aprendizagem de tópicos de MQ. Esse tema foi escolhido pelo autor devido às suas perspectivas atuais no ensino da Física.

Levando, contudo, em consideração a presença da Mecânica Quântica em aplicações tecnológicas em larga escala no mundo atual, afetando diretamente a economia de países desenvolvidos e a vida cotidiana global, diante disso, julga-se importante o estudo de conceitos quânticos através da utilização de *softwares* para complementar as abordagens tradicionais de ensino, proporcionando ao aluno a visualização dos fenômenos quânticos do mundo simulado por meio de um processo de experimentação. Cabe ressaltar que a interação aluno-simulador potencializa a sua pré-disposição em entender os conceitos apresentados.

Devido a esses fatores, figura-se como base teórica desta pesquisa a TMC proposta por Souza (2004), construída sob o diálogo com teóricos consolidados, como Piaget e Vygostsky, apresentando também suas características com perspectivas atuais, possibilitando o estudo da interação computador – estudante no processo de modificação da estrutura cognitiva.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PESQUISA

“A atividade básica da ciência é a pesquisa”. Esta afirmação de Demo (2008, p.22) pode soar estranha, como alega o próprio autor, porque muitas vezes as pessoas têm a ideia de que a ciência se concentra na atividade de ensino (transmitir conhecimento) e de aprendizagem (absorver conhecimento), sendo que essas atividades são subsequentes, ou seja, sucedem o fenômeno fundamental da geração do conhecimento. Desta forma, Gil (2006) define a pesquisa como um procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas propostos. Indo mais além, a pesquisa em educação em Ciências busca produzir conhecimentos resultantes da busca de respostas a perguntas vinculadas ao ensino, aprendizagem, currículo, formação permanente do corpo docente, enfim sobre um contexto educativo em Ciências, dentro de um quadro epistemológico, teórico e metodológico (MOREIRA, 2002).

A pesquisa é desenvolvida mediante o concurso dos conhecimentos disponíveis e a utilização cuidadosa de métodos, técnicas e outros procedimentos científicos (GIL, 2006, p. 17). Com o objetivo de chegar à veracidade dos fatos, a ciência se vale de diferentes métodos. A metodologia da pesquisa em educação/ensino em ciências é a mesma da pesquisa em educação, e essa foi dominada, ao longo do século XX, por dois paradigmas clássicos: um inspirado na metodologia das ciências naturais, enfatizando 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; YIN, 2001; DEMO, 2008; APPOLINÁRIO, 2012).

### 5.2.1 A opção pela Pesquisa Qualitativa (Interpretativa)

Nas atividades propostas por esta pesquisa, toma-se o ser humano como o foco principal do estudo, devido à intenção de verificar na estrutura cognitiva do estudante quais representações e *drivers* são adquiridos e/ou modificados durante uma mediação hipercultural.

Portanto, buscou-se utilizar métodos qualitativos para obter e analisar os dados da investigação.

Essa escolha se dá, pois a pesquisa qualitativa em educação, de acordo com Moreira (2002), parte dos seguintes pressupostos: a realidade é construída socialmente; o que existe é dependente da mente humana; o que se pesquisa não é independente do processo; os instrumentos dependem do que deve ser medido, “são extensões dos pesquisadores na sua tentativa de construir ou de formar a realidade” (p.8); a realidade do ambiente/sujeito investigado é particular e depende da pesquisa; a verdade é questão de concordância em um contexto.

Os objetivos desta pesquisa correlacionam-se com os objetivos da pesquisa qualitativa. Erickson (1986) apresenta os principais objetivos da abordagem qualitativa em pesquisas voltadas à educação, sendo eles: procurar a compreensão do fenômeno segundo a perspectiva dos atores através da participação em suas vidas; foco nos significados e experiências; ênfase em ações e não em comportamentos.

Diante deste panorama, pode-se traçar o perfil adotado por este trabalho, no qual, preocupa-se com as representações e *drivers* individuais dos alunos, buscando identificar a maneira com que cada sujeito da pesquisa assimila as informações obtidas ao longo da interação com os *softwares* em seu papel de processadores externos de informação. As interpretações dos alunos, bem como os *drivers* utilizados diante das situações propostas a respeito da dualidade, são obtidas em diversos momentos<sup>15</sup>, sendo considerados os textos, as falas e os gestos descritivos dos alunos.

Desta forma, justifica-se a escolha pela pesquisa educacional com abordagens qualitativas.

#### Método qualitativo: O estudo de caso

A pesquisa qualitativa, de acordo com Erickson (1986), possui uma perspectiva direcionada às ações e critérios de validades, tendo significados imediatos definidos como ponto de vista de seus próprios autores, uma vez que, este método procura a explicação interpretativa através do estudo detalhado de um caso único ou através de comparação com outros estudos semelhantes.

---

<sup>15</sup> As etapas da realização do experimento serão explicadas detalhadamente na seção 5.5.

Segundo Yin (2001), o estudo de caso deve ter um planejamento flexível, em razão de o investigador ser confrontado com situações complexas nas quais ele deseja descrever, analisar ou apreender o fenômeno do processo quando pretende investigar o “como” e “porque” em um conjunto de eventos. Sendo assim, “pouquíssimos estudos de caso terminarão exatamente como foram planejados” (YIN, 2001, p.83), em virtude das necessidades surgirem durante o estudo.

O caso de estudo desta pesquisa considera a identificação de *drivers* que reportam os conhecimentos e as interpretações, de estudantes em fase final de um curso de Licenciatura em Física, referentes ao tema da dualidade da matéria e da radiação eletromagnética, após a utilização de ferramentas hiperculturais em forma de laboratórios (ou bancadas) virtuais.

Torna-se importante destacar os traços essenciais do estudo de caso qualitativo, que, de acordo com Serrano (1998), são:

- *Particularização*: centram em uma situação, evento, programa ou fenômeno particular;
- *Descrição*: o produto final é uma descrição rica e densa do objeto de estudo;
- *Heurística*: iluminam a compreensão do leitor a respeito do objeto de estudo;
- *Indução*: baseiam-se no raciocínio indutivo. As teorias, os conceitos ou as hipóteses surgem de um exame dos dados fundados no mesmo contexto.

O desenvolvimento de um estudo de caso abrange a lógica de planejamento, bem como as técnicas e as abordagens da coleta de dados e as análises descobertas, existindo uma convergência de informações sobre o fenômeno (YIN, 2001).

Para compreender um estudo de caso, é preciso fazer uma profunda análise das interdependências das partes e dos padrões que emergem. Portanto, as técnicas de pesquisa qualitativa são frequentemente as mais adequadas, por se tratarem de técnicas descritivas, detalhadas e persuasivas.

Segundo Yin (2001), pode-se construir um esquema das etapas para a validação de um estudo de caso. Dessa forma, a presente pesquisa buscou seguir as seguintes:

- ✓ A primeira consistiu na delimitação do conteúdo de estudo. Nesta pesquisa, o conteúdo de estudo é um tópico fundamental da MQ, a dualidade da matéria e da radiação eletromagnética. A partir dessa delimitação, “questões e pontos críticos” iniciais tiveram origem. Após o exame da literatura e experiências pessoais de especialistas no assunto, as principais questões emergentes foram:  
1) O ensino da dualidade onda-matéria, considerado fundamental e básico no

estudo da MQ, está proporcionando o entendimento físico/conceitual e matemático correto para os alunos em fase final de um curso de Licenciatura em Física? 2) O uso de *softwares* em forma de laboratórios virtuais podem, e em caso positivo, de que forma contribuir tanto para o ensino quanto para a aprendizagem (mudança na estrutura cognitiva do estudante, aquisição e/ou modificação de *drivers* específicos) da dualidade?

- ✓ A segunda determinou o foco da investigação e estabeleceu os contornos do estudo, incorporando a escolha dos sujeitos<sup>16</sup> para a investigação, elaboração das atividades desenvolvidas com os estudantes em sala de aula, bem como os instrumentos para a coleta de dados<sup>17</sup>.
- ✓ A terceira englobou a exploração e a união de todos os dados e encaminhamentos obtidos ao longo da pesquisa. Essas informações foram utilizadas para subsidiar a análise sistemática de acordo com o aporte teórico, afim de, por meio da indução, obter “respostas” para as perguntas iniciais, concluindo o estudo.

#### A análise no estudo de caso: fidedignidade, generalização e validade

A fidedignidade de um trabalho refere-se a estabilidade dos resultados, ou seja, o grau de consistência, credibilidade e confiabilidade dos dados. Assim, a fidedignidade das medições e dos instrumentos são requisitos básicos, no entanto, na abordagem qualitativa, ela deve ser tratada de outra forma, já que, os instrumentos são uma extensão do pesquisador (YIN, 2001).

Quanto a generalização, associam-se os aspectos de universalidade dos fenômenos estudados, ela não é automática, logo

[...] deve-se testar uma teoria através da replicação das descobertas em um segundo ou mesmo em um terceiro local, nos quais a teoria supõe que deveriam ocorrer os mesmos resultados. Uma vez que seja feita essa replicação, os resultados poderiam ser aceitos ' por um número muito mais amplo de bairros semelhantes, mesmo que não se realizem mais replicações. Essa lógica de replicação é a mesma que subjaz a utilização de experimentos (e permite que os cientistas generalizem de um experimento a outro) (YIN, 2001, p.59).

---

<sup>16</sup> As amostras para a análise serão descritas em detalhes na seção seguinte.

<sup>17</sup> Os instrumentos para a coleta de dados também serão detalhados mais adiante, na seção 5.4.

O autor também destaca que “A estrutura teórica torna-se mais tarde o instrumento para generalizar a casos novos, novamente semelhantes ao papel desempenhado de projetos de experimentos cruzados” (YIN, 2001, p.69). Em suma, a generalização tem a ver com a validade dos estudos.

O instrumento será válido ao que ele mede e principalmente no que se espera que ele meça, passando a figurar os estudos de validação, pois são fontes essenciais de informações, dando suporte às interpretações por meio das análises e processos dos resultados observados ao longo da apuração dos dados levantados.

Taft (1988) considera a verdade na abordagem qualitativa uma questão de concordância em contexto, assim a definição de validade identifica-se com o termo credibilidade, que depende do convencimento da comunidade de pesquisadores e leitores com relação às evidências apresentadas e aos processos utilizados. A credibilidade depende do convencimento da comunidade de pesquisadores e leitores com relação às evidências apresentadas e aos processos utilizados.

Com o objetivo de alcançar credibilidade, esta pesquisa buscou seguir as estratégias sugeridas por Sturman (1988):

- ✓ Os procedimentos de coleta de dados devem ser explicados;
- ✓ Os dados recolhidos devem ser apresentados e estar prontos para reanálise;
- ✓ Instâncias negativas devem ser relatadas;
- ✓ Vieses devem ser reconhecidos;
- ✓ Análises de trabalhos de campo devem ser documentadas;
- ✓ A relação entre asserção e evidência deve ser esclarecida;
- ✓ Evidências primárias devem ser distinguidas das secundárias, assim como as descrições das interpretações;
- ✓ Diários ou logs devem dar conta do que foi feito durante as distintas fases do estudo;
- ✓ Técnicas devem ser desenhadas para "checar" a qualidade dos dados.

Diante deste cenário, esta pesquisa possui como propósito apresentar os dados com qualidade das conclusões a partir dos critérios abordados.

### 5.3 SUJEITOS DA PESQUISA

As atividades propostas por esta pesquisa foram realizadas com um grupo de 12 estudantes, cursando o sétimo período do curso de Licenciatura em Física, de um total de oito da grade curricular vigente. Dentre os 12 alunos, 7 cumpriram por completo todas as etapas

propostas<sup>18</sup>, sendo 3 discentes de uma instituição de ensino pública, da cidade de Bento Gonçalves-RS, e 4 discentes de uma instituição privada, da cidade de Canoas-RS.

Optou-se pela escolha de desenvolver as atividades com os acadêmicos em fase final do curso pelo fato de os pré-requisitos necessários para maior absorção conceitual ao longo da atividade com os softwares propostos já terem sido cursados, ou seja, conteúdos referentes à teoria eletromagnética. E neste cenário, o estudo das radiações eletromagnéticas em sua composição e propagação, também são necessários conhecimentos em óptica geométrica e física para que fenômenos como a difração e interferência sejam conhecidos. Nenhum dos 7 alunos que cumpriram por completo todas as etapas propostas já haviam tido contato com softwares que abordassem o interferômetro de Mach-Zehnder e a Dupla Fenda de Young.

Por este estudo utilizar métodos qualitativos na coleta e análise dos dados, não foi encontrada na literatura pesquisada uma menção quanto ao número mínimo exigido para a quantidade de sujeitos. No entanto, Backer e Edwards (2012) comentam que a quantidade das amostras depende do objetivo da pesquisa, sendo que os dados obtidos devem contemplar os fins da investigação. Portanto, nesta pesquisa, julga-se a quantidade de sujeitos suficiente, pois emergiram resultados conclusivos que são utilizados para atender os objetivos inicialmente estipulados e chegar a ponderações direcionadas ao problema norteador de pesquisa.

#### 5.4 PRODUÇÃO DE DADOS: OS INSTRUMENTOS DE COLETA

Para que uma análise fidedigna de dados qualitativos possa ser realizada, Yin (2001) sugere a elaboração do maior número possível de instrumentos para a coleta dos dados. Para tanto, foram utilizados como instrumentos de coleta: um pré-teste escrito e resolvido individualmente; um guia com o roteiro de atividades escrito e resolvido individualmente; um pós-teste escrito e individual, seguido de uma entrevista pautada nas respostas escritas do pós-teste.

Para a validação dos instrumentos, os mesmos foram aplicados a três estudantes que não participaram do experimento, mas que estavam praticamente no mesmo nível de graduação que os estudantes participantes da investigação. O processo consistiu, basicamente, em uma simulação do experimento. Os alunos responderam o pré-teste, realizaram a atividade com os *softwares*, responderam o pós-teste e participaram da entrevista ao final. Durante

---

<sup>18</sup> As etapas que compuseram o experimento serão apresentadas na seção 5.5.

todas as etapas, fora observado o comportamento dos estudantes na compreensão das questões, a ponto de verificar se estavam redigidas de acordo e se não apresentavam dubiedade em sua interpretação. Verificou-se a compreensão do guia de atividades e o entendimento no manuseio das bancadas virtuais. Por fim, as entrevistas simuladas colaboraram para o viés a ser seguido, uma espécie de pauta com questões chaves inseridas nas entrevistas do experimento.

Na sequência, um crivo foi realizado a partir de uma análise crítica dos autores ao material produzido e testado, “liberando-o” para o seu uso no experimento proposto por esta pesquisa.

#### 5.4.1 O Pré-teste

O pré-teste<sup>19</sup> elaborado consiste em nove questões, sendo seis questões abertas e três fechadas. O objetivo desse instrumento é verificar, antes de qualquer intervenção hipercultural (proposta 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. As questões serão apresentadas e comentadas a seguir:

- ✓ Questão 1) Você já cursou esta disciplina (Física Moderna/Mecânica Quântica) antes, sem aprovação? (SIM) (NÃO)
- ✓ Questão 1.1) Em caso positivo, você: (A) Não atingiu média suficiente para ser aprovado (B) Não atingiu frequência mínima nas aulas para ser aprovado (C) Você desistiu da disciplina antes do término do semestre.
- ✓ Questão 1.2) Você já cursou alguma disciplina que tenha abordado conteúdos quânticos? Se sim, qual disciplina? E você ainda lembra-se de algum conteúdo/tópico?
- ✓ Questão 1.3) Atualmente, você está lecionando? Em caso positivo, escreva quais disciplinas e em quais séries.

As quatro questões iniciais buscaram estabelecer um vínculo com o estudante, isto é, estavam interessadas na trajetória acadêmica dos alunos e, em especial, na sua proximidade com os conteúdos da mecânica quântica.

- ✓ Questão 2) Você sabe se existe alguma diferença entre um objeto microscópico e um macroscópico? Por exemplo, entre um elétron e um grão de areia. Explique.

---

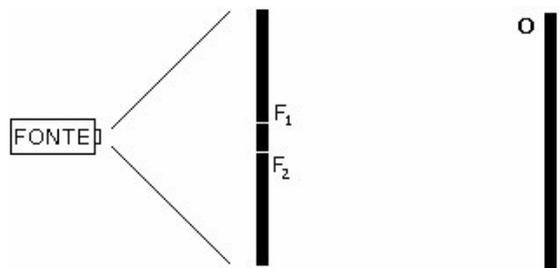
<sup>19</sup>Encontra-se na íntegra no Apêndice A.

- ✓ Questão 4) 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 duas questões foram inseridas com a intenção de abordar os aspectos do objeto quântico, extraíndo do aluno as suas interpretações frente ao que ele considera um objeto microscópico, explicando a sua visão do elétron e do fóton. A expectativa é de que os alunos utilizem um “posicionamento” intuitivo, utilizando a palavra partícula ou mencionando a luz em suas explicações.

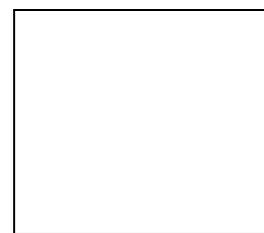
- ✓ Questão 5) A figura abaixo representa uma montagem experimental, vista de cima, de um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa. O feixe luminoso passa por duas fendas estreitas e paralelas,  $F_1$  e  $F_2$ , antes de ser projetado num anteparo  $O$ , constituído de uma tela fosforescente.

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



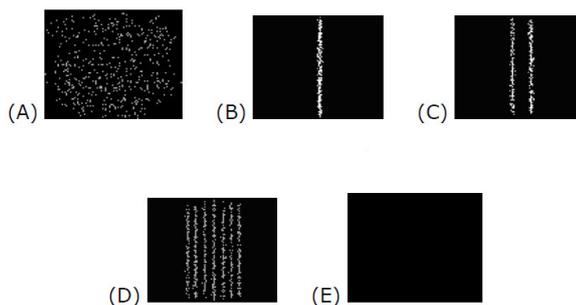
Desenhe a imagem que melhor represente o anteparo  $O$ , visto de frente, após a fonte ser ligada.

Por que você optou por desenhar esta imagem?



Anteparo  $O$  (Visão frontal)

- ✓ Questão 6) 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?



As duas últimas questões foram extraídas do trabalho de Pereira, Ostermann e Cavalcanti (2009), ambas as questões utilizam o mesmo arranjo experimental, diferem apenas na fonte emissora, fazendo com que o estudante analise na questão 5 uma fonte emitindo um feixe de luz monocromático coerente e, na questão 6, observe a fonte emitindo um fóton de cada vez (sendo que o fóton seguinte só é emitido pela fonte quando o anterior se choca com o anteparo). Através das respostas dos alunos, pode-se obter um panorama prévio em relação aos conceitos básicos da dualidade intrínsecos em cada um.

O pré-teste é finalizado com a solicitação de um e-mail pessoal do estudante, para que assim ele possa ser contatado durante as etapas da pesquisa. Os pré-testes foram resolvidos individualmente pelos discentes.

#### 5.4.2 O Pós-teste

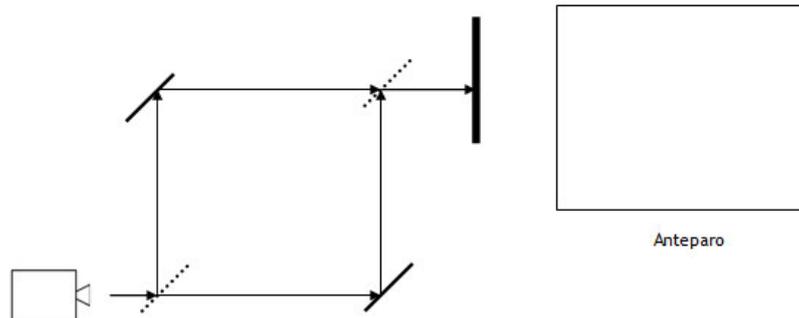
O pós-teste<sup>20</sup> elaborado e validado é composto por seis questões, dentre elas, cinco são abertas e apenas uma fechada. O objetivo desse instrumento é o de verificar as respostas dos estudantes após a realização da atividade com os laboratórios virtuais. O conteúdo abordado equivale-se, no geral, ao do pré-teste, sendo possível, assim, realizar uma comparação pré e pós intervenção hipercultural. As questões serão apresentadas e comentadas a seguir:

- ✓ Questão 1) 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 essa 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). Depois, explique o desenho. Você

<sup>20</sup> Encontra-se na íntegra no Apêndice B.

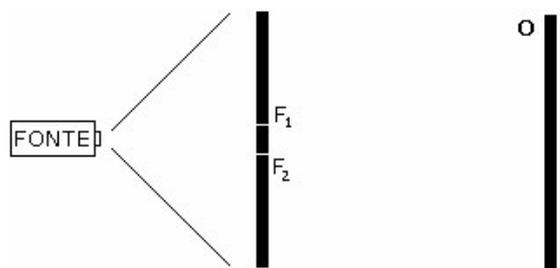
poderia descrever o comportamento desses fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.



Essa questão não consta no pré-teste, ela aborda o arranjo experimental do interferômetro virtual (*software A*), exigindo do aluno a interpretação do fenômeno que ocorre com um fóton ao passar pelos espelhos semi-refletores e refletores. Espera-se que os estudantes respondam corretamente desenhando no anteparo o padrão de interferência (ondulatório), justificando, posteriormente, a sua escolha ao explicar todos os passos do fóton ao longo do caminho. Por meio dessas respostas, pode-se analisar a interpretação do estudante quanto ao comportamento do fóton.

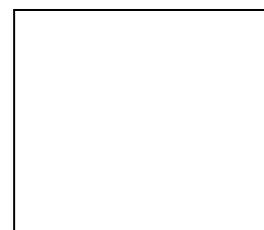
- ✓ Questão 2) A figura abaixo representa uma montagem experimental, vista de cima, de um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa. O feixe luminoso passa por duas fendas estreitas e paralelas,  $F_1$  e  $F_2$ , antes de ser projetado num anteparo  $O$ , constituído de uma tela fosforescente.

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



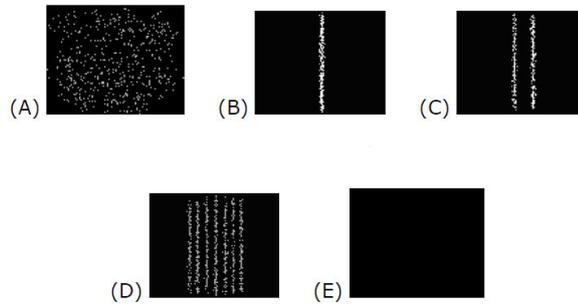
Desenhe a imagem que melhor represente o anteparo  $O$ , visto de frente, após a fonte ser ligada.

Por que você optou por desenhar esta imagem?



Anteparo  $O$  (Visão frontal)

- ✓ Questão 3) 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?



Essas duas questões são idênticas ao pré-teste, e serão utilizadas para comparar as respostas obtidas antes e depois da mediação hipercultural.

- ✓ Questão 4) Observando o arranjo experimental representado anteriormente, mas considerando que a fonte esteja emitindo bolas de gude, e que as fendas tenham diâmetro da mesma ordem de grandeza dessas bolas. As bolas emitidas atingem o anteparo de observação após atravessarem as duas fendas, deixando marcas no anteparo, após algumas horas de funcionamento da fonte. Desenhe a imagem que melhor representa a situação.

Essa questão pretende analisar a interpretação do aluno quando objetos macroscópicos passam pelo aparato experimental da fenda dupla. Buscando, assim, verificar se a interpretação do aluno apresenta diferença ao analisar objetos quânticos e objetos grandes, como bolas de gude.

- ✓ Questão 5) 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.
- ✓ Questão 6) 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.

As duas últimas questões do pós-teste são bem objetivas, exigem do aluno a argumentação e o seu entendimento em relação ao comportamento dual dos objetos quânticos, proporcionando espaço para o aluno dissertar sobre suas convicções em relação ao fenômeno fundamental da MQ.

Todas as questões do pós-teste são utilizadas como pauta para a entrevista realizada individualmente com os alunos, no entanto, esse processo será detalhado mais adiante, na seção 5.6 (análise de dados).

## 5.5 DELINEAMENTOS METODOLÓGICOS – O EXPERIMENTO

Analisando a pergunta de pesquisa norteadora deste trabalho, na qual questiona-se a construção ou modificação de novos *drivers* hiperculturais durante a mediação digital caracterizada pelo uso de laboratórios virtuais (ou bancadas virtuais), que possibilitam o estudo de um tópico da TQ, sendo o comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética o conteúdo em questão, procurou-se elaborar uma atividade que envolvesse a manipulação dos estudantes em dois *softwares* que simulam e apresentam comportamentos para a matéria e para a radiação eletromagnética, buscando extrair dos estudantes a sua interpretação, de acordo com o arranjo experimental virtual montado e o fenômeno resultante que é observado.

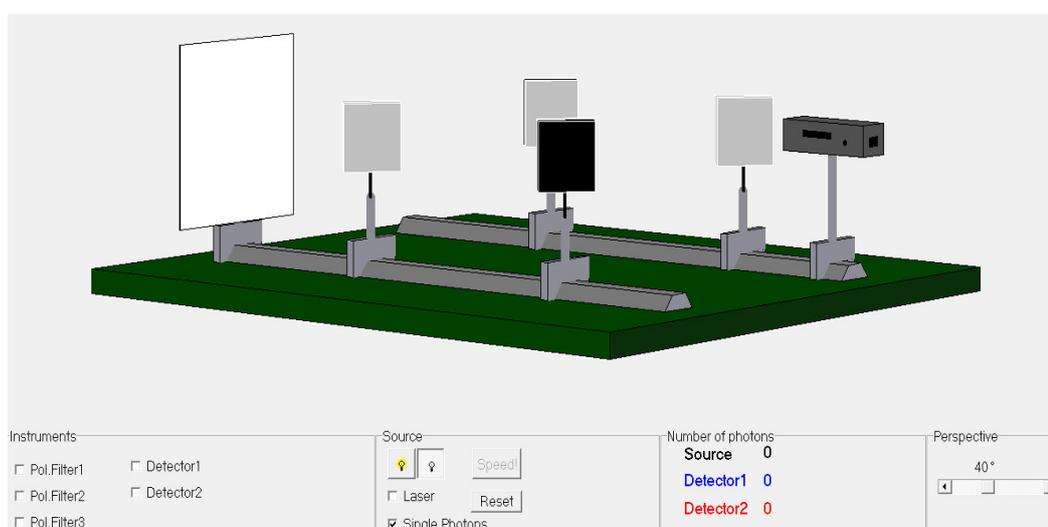
Nesse sentido, o desafio passa a ser o de extrair e identificar através de uma metodologia de análise consistente e aceita, as interpretações, as imagens mentais, os *drives* construídos ou modificados dos estudantes após a sua interação com os laboratórios virtuais.

Diante deste cenário, as atividades realizadas com os estudantes foram planejadas e executadas em quatro momentos:

- 1) **Pré-teste individual:** No primeiro momento, um pré-teste foi construído e validado pelos autores e, posteriormente, aplicado aos estudantes, antes que os mesmos tivessem qualquer contato com os *softwares* que serão utilizados como proposta deste trabalho. Esta etapa teve a duração média de uma hora/aula.

2) **Atividade individual com dois softwares computacionais:** Nesta fase, foi entregue aos alunos um roteiro de atividades<sup>21</sup> para conduzir a utilização dos dois softwares propostos. Os simuladores foram empregados segundo a abordagem P.O.E. (*predict-observe-explain*), 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 (WU et al., 2001). É durante esse estágio, que teve duração de 6 horas/aula, que acreditamos ocorrer a possível internalização dos *drives* intrínsecos às representações computacionais. O *software A* - Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder (Fig. 16) - permite ao usuário observar o fenômeno de interferência produzido por um feixe de luz por fótons individuais.

Figura 16 - Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder.

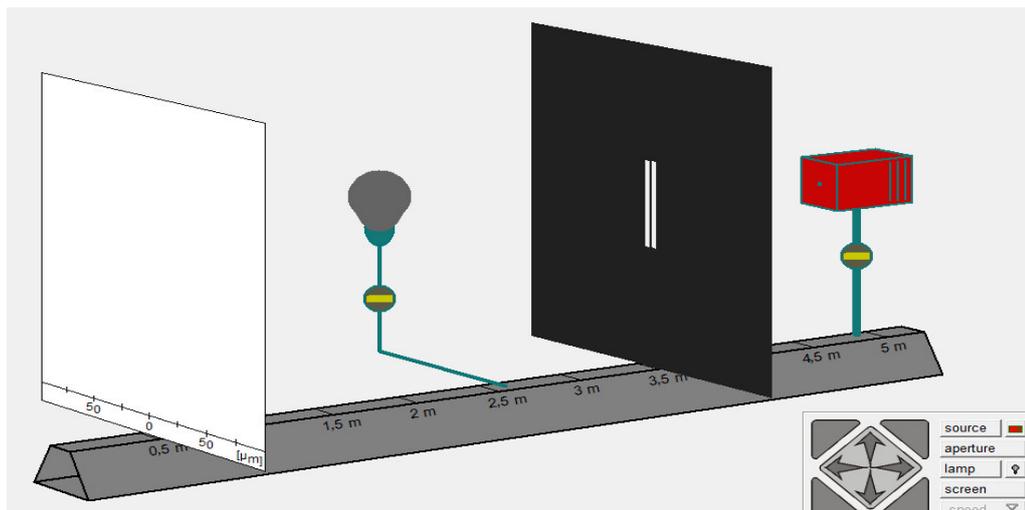


Fonte: O *software*.

O *software B* - Fenda Dupla de Young (figura 17) - permite observar o comportamento de objetos clássicos e quânticos ao passarem por fendas estreitas e muito próximas.

<sup>21</sup> Encontra-se na íntegra no Apêndice C.

Figura 17 - Arranjo experimental virtual da Fenda Dupla de Young.



Fonte: O software.

- 3) **Pós-teste individual:** Uma semana após o término das atividades utilizando os softwares, foi aplicado aos alunos o pós-teste (Apêndice B), contendo um total de seis questões, sendo elas abertas e fechadas, referentes ao mesmo conteúdo abordado no pré-teste, ou seja, o comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética.
- 4) **Entrevista individual do pós-teste:** Esta etapa consiste em entrevistas realizadas individualmente com os alunos, tendo como pauta as questões e as respostas do pós-teste, com o objetivo principal de proporcionar a explicação do aluno para as suas resoluções das questões, verificando, assim, quais os processos de pensamento que 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*” (RAMOS, 2015). 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 utilizar a técnica adaptada do protocolo original “*Think Aloud*” foi tomada levando em consideração as principais vantagens e desvantagens em cada método, a saber: a vantagem da técnica original é a de que os estudantes resolvem as questões e, ao mesmo tempo, explicam o seu raciocínio ao

entrevistador, 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 pelos estudantes foram efetivamente os mesmos utilizados para a resolução do problema (que, em geral, ocorre uma semana antes da entrevista); contudo, o processo de resolução dos problemas propostos não é perturbado pela técnica e ocorre mais naturalmente. Analisando trabalhos de Ramos (2015) e Wolff (2015), 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. As entrevistas foram gravadas e transcritas, tal como os áudios produzidos pelos alunos (*sic*), para a devida análise. Os alunos foram entrevistados três semanas após as atividades com os *softwares* terem sido realizadas.

## 5.6 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 pré e pós-testes, foram apreciadas com base na análise textual discursiva de Moraes e Galiuzzi (2007). Por sua vez, a linguagem não verbal, caracterizada pelos gestos descritivos realizados pelos estudantes durante as entrevistas, e principal ferramenta de identificação de *drivers* adotada, foi analisada a partir da adaptação da metodologia oferecida pela linha de trabalho 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 textual discursiva

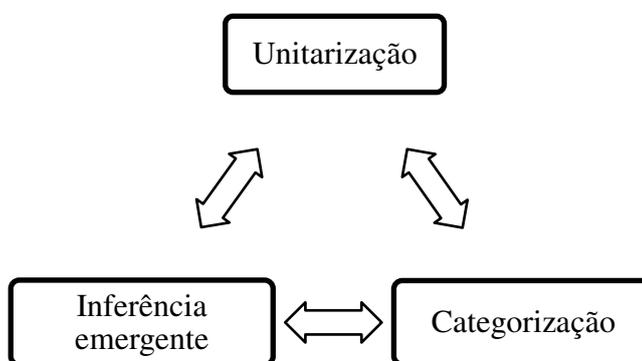
A análise textual discursiva proposta por Moraes e Galiuzzi (2007) é empregada neste trabalho na análise da linguagem verbal presente nos instrumentos para as coletas dos dados produzidos pelos sujeitos envolvidos na pesquisa, o chamado *corpus*.

Conforme a descrição feita por Moraes e Galiazzi (2007), a análise textual discursiva pode ser entendida como

O processo de desconstrução, seguido de reconstrução, de um conjunto de materiais lingüísticos 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, conforme o Esquema 1.

Esquema 1 - Etapas principais da Análise



Fonte: A pesquisa.

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, possibilitando 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 comunicar 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.

### **5.6.2 Análise gestual descritiva**

A metodologia de análise gestual adotada por esta pesquisa é baseada pela linha de trabalhos de Monaghan e Clement (1999), Clement (2006) e Clement e Stephens (2010), e pelas teses de doutoramento de Wolff (2015) e Ramos (2015). Esses trabalhos sugerem o estabelecimento de uma relação entre imagens mentais presentes na estrutura cognitiva do aluno e gestos realizados pelo mesmo.

A base metodológica de Monaghan e Clement (1999) consiste em utilizar alguns indicadores, tais como os movimentos de mãos para sugerir 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 às suas visualizações internas (simulação mental do raciocínio), após a mediação hipercultural (em forma de bancadas virtuais), por meio da sua externalização gestual.

A interpretação dos gestos poderá fornecer informações que não são identificadas apenas através da fala. Wolff (2015) afirma isso com o intuito de reforçar 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

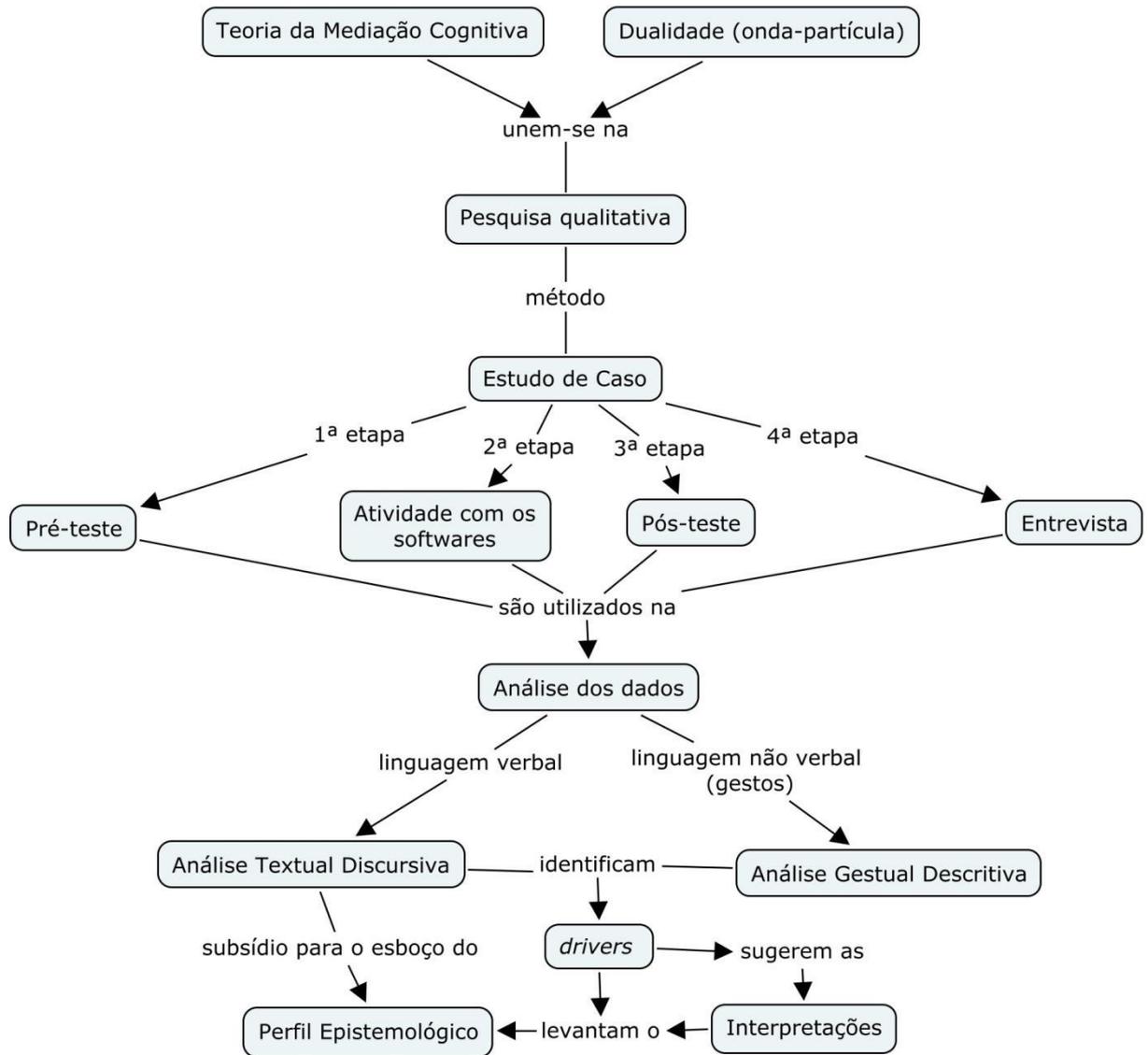
relacionada com a transmitida verbalmente, sem que ambas devam ser necessariamente a mesma informação transmitida. Portanto, os gestos podem auxiliar na transmissão de informação sempre que houver dificuldade de expressão verbal.

Assim, é possível identificar padrões de gestos e relacioná-los com os conhecimentos implícitos – considerados nesta pesquisa como *drivers* – existentes na estrutura cognitiva dos estudantes. Aqui, consideram-se 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 *drivers* adquiridos e/ou modificados após a atividade desenvolvida com os *softwares* propostos.

## 5.7 RESUMO DA METODOLOGIA EM FORMA DE DIAGRAMA

Com o intuito de facilitar o entendimento do leitor acerca dos delineamentos metodológicos adotados nesta pesquisa, o Diagrama 1, a seguir, sintetiza os processos mencionados.

Diagrama 1 - Síntese da metodologia utilizada nesta pesquisa.



Fonte: A pesquisa.

A seguir, será tratada a análise dos dados e os resultados obtidos ao longo do caminho percorrido por esta pesquisa.

## CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Neste capítulo, serão analisados os dados oriundos do experimento que compõe esta pesquisa, lembrando que a elaboração e execução do mesmo foram descritas no capítulo anterior. A partir desses dados obtidos através dos pré-testes e pós-testes, e principalmente por meio das entrevistas gravadas em áudio e vídeo, pretende-se retratar as possíveis alterações conceituais vividas pelos estudantes por meio do uso dos *softwares* em forma de bancadas virtuais. Procura-se, também, levantar os perfis epistemológicos dos estudantes acerca da dualidade onda-partícula por meio das interpretações e justificativas apresentadas durante as explicações das respostas para determinados questionamentos propostos ao longo da atividade.

Neste trabalho, opta-se pela apresentação da análise dos dados e resultados de 4 (quatro) alunos. Essa escolha deve-se ao fato de esses alunos terem se comportado com maior naturalidade na entrevista, apresentando dados suficientes para, após a análise, inferir resultados que supram os objetivos inicialmente propostos, possibilitando, então, chegar a elucidacões a respeito da questão principal, norteadora desta pesquisa.

### 6.1 ANÁLISE

O movimento de análise se deu confrontando as 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<sup>22</sup> dos pós-testes, já que o conteúdo verbal é analisado juntamente com os gestos descritivos dos alunos. Nas transcrições não são utilizados os nomes dos alunos, os mesmos passarão a ser chamados pela letra “A”, seguida de um número, como, por exemplo, A1 (Aluno 1), e assim até o A4. Após a conclusão das transcrições, entrelaçou-se o conteúdo emergido e as respostas escritas dos pré-testes e pós-testes.

A apresentação dos dados em companhia das suas análises seguirá uma sequência na qual todo o conteúdo de um aluno é apreciado antes do próximo ser exibido, isto é, todas as questões respondidas pelo aluno estão relacionadas aos dois *softwares* e a todos os fenômenos abordados ao longo das atividades. Com base nessa análise, serão apontados, ao longo das

---

<sup>22</sup> As transcrições das entrevistas estão disponíveis em <https://goo.gl/3FR1Ct>.

respostas e interpretações para as questões, os possíveis *drivers* modificados e/ou construídos na estrutura cognitiva dos alunos, para que, na sequência, sejam levantados os perfis epistemológicos relacionados à dualidade onda-partícula.

## 6.2 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A1”

Inicialmente, é importante lembrar ao leitor que foi efetuado um pré-teste escrito. Em seguida, há o experimento e finalizou-se com um pós-teste escrito, seguido de uma entrevista consolidada de ambos os testes. Neste momento, apresentar-se-ão os resultados expressos pelo A1. As primeiras questões foram voltadas aos fenômenos relacionados ao IMZ. Ao explicar a trajetória, bem como o comportamento de apenas um fóton, passando pelo interferômetro, desde a fonte de emissão até o contato com o anteparo cintilante, o A1 imagina o fóton sendo dividido em dois ao se deparar com o primeiro espelho semi-refletor do interferômetro. “[...] aqui eu imaginei que o fóton, ele é emitido né pela fonte e aí tem um dispositivo que separa né, faz o fóton seguir um caminho, divide o fóton, cada um segue um caminho” (A1). (Fig. 18-I).

Dando sequência à explicação de seu raciocínio, o aluno afirma imaginar o segundo espelho semi-refletor, unindo os dois fótons surgidos a partir da interação com o primeiro espelho semi-refletor. “Depois ele tem dois espelhos né, ele vai ser refletido e no final ele vai, os dois, essas duas divisões vão acabar juntando (Fig.18- II) e vão formar o fóton de novo” (A1).

Figura 18 - (I) A1 utilizando as mãos para simular a trajetória do fóton, que dividido toma o caminho da direita e da esquerda, (II) Mãos apontando para o mesmo ponto, simulando o encontro das partes (ondas) do fóton.

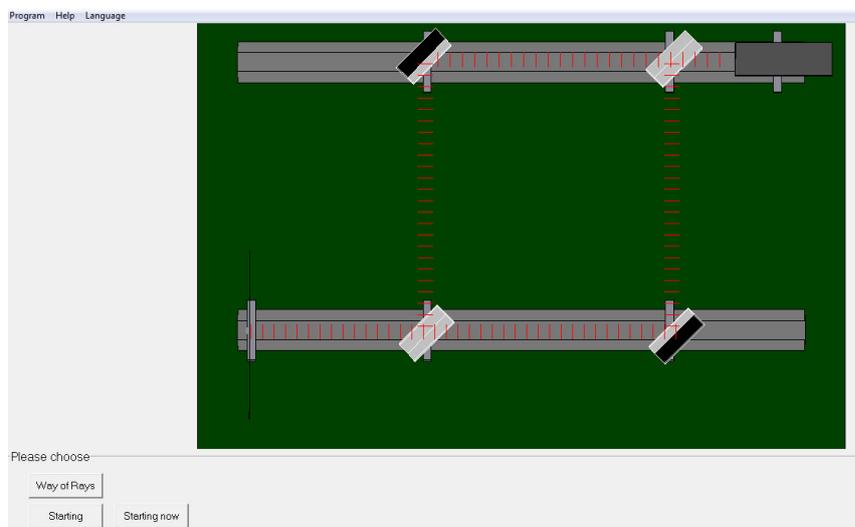


Fonte: A pesquisa.

Podemos verificar que o aluno utiliza de forma explícita uma representação externa para a resolução da situação-problema. O estudante se apropria dessa representação tanto no discurso verbal quanto no não verbal. Ao separar o fóton em duas frentes de onda, ele faz uso

de um *driver* provavelmente internalizado, após a utilização do *software*, que apresenta em seu início as possíveis trajetórias de um feixe luminoso (Fig.19).

Figura 19 - Trajetórias possíveis para o feixe de luz e fótons.



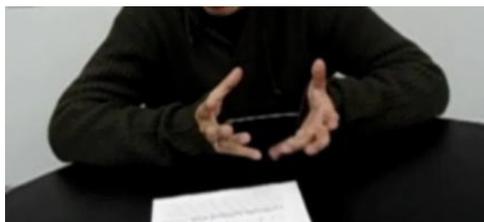
Fonte: Extraído do *software*.

E, ao ser questionado quanto ao comportamento do fóton durante seu percurso pelo interferômetro, o aluno descreve-o da seguinte forma:

A1: Se a gente for pensar no fóton como uma **onda** né, como ele é dividido e depois ele se reencontra lá, as duas ondas, elas vão se encontrar em fases diferentes, aí como elas tem fases diferentes, vai formar esses picos de máximos e mínimos de interferência.

O estudante imagina o fóton com um comportamento ondulatório ao passar pelo interferômetro, mas o fóton isolado é imaginado como uma partícula, de acordo com a fala e o gesto apresentado por ele. O gesto descritivo, ilustrado na Figura 20, apresentado pelo A1, juntamente com o seu discurso, indica que a imagem mental associada a um fóton individual é de uma partícula (corpúsculo) em contraposição à imagem ondulatória que o mesmo utiliza dentro do experimento. “[...] Se for imaginar ele, eu vou acabar imaginando ele como **partícula**. [...] Como se fosse uma esfera (Fig. 20), uma esfera brilhante né, por ser fóton a gente imagina alguma coisa que brilhe” (A1).

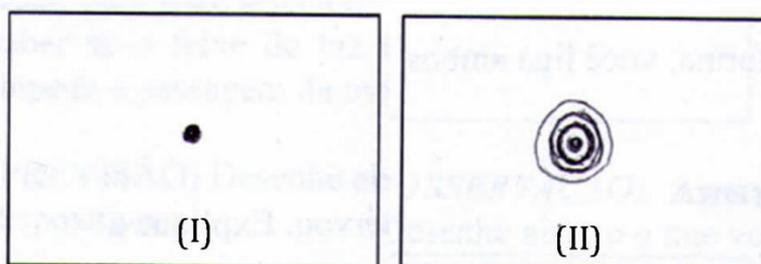
Figura 20 - A1 utilizando as mãos para representar uma esfera.



Fonte: A pesquisa.

O comportamento ondulatório do fóton ao passar pelo interferômetro é caracterizado por A1 quando o mesmo desenha um padrão de interferência no anteparo de observação do pós-teste. Verifica-se uma evolução na interpretação e representação do aluno, tendo em vista que, no guia de atividades, o desenho na etapa de “previsão” (da técnica P.O.E utilizada no roteiro) é o de um ponto (Fig. 21-I), caracterizando um padrão corpuscular, mas ao simular o IMZ sem nenhum detector ativado surge um padrão de interferência, padrão esse desenhado (Fig. 21-II) pelo aluno na etapa “observação”. Muito provavelmente, o estudante reporta a representação ondulatória utilizada para interpretar o experimento que fora adquirida ao perceber, após observar o resultado da bancada virtual, que existe um padrão de interferência (não desenhado apenas no pré-teste).

Figura 21 - Desenho realizado na etapa “previsão” do roteiro de atividades. (II) Desenho realizado na etapa “observação” do roteiro de atividades.



Fonte: A pesquisa.

Através das figuras apresentadas, identifica-se a mudança nas representações utilizadas por A1. A figura exposta no pós-teste é influenciada pela interpretação do aluno diante da figura apresentada pelo IMZ após a sua simulação. Em síntese, inicialmente, o aluno prevê um comportamento corpuscular e o representa no anteparo, no entanto, após a utilização da ferramenta hipercultural, a sua interpretação é alterada, fazendo com que o resultado do desenho do pós-teste seja uma imagem, caracterizando um padrão de interferência

(ondulatório). As imagens não são idênticas, isto é, o desenho realizado pelo aluno no pós-teste não é o mesmo que o apresentado pelo interferômetro virtual, mas ambos representam o mesmo fenômeno de interferência e, conseqüentemente, um comportamento ondulatório para o fóton, Isso mostra que A1 utiliza imagens mentais adaptadas a partir de sua interpretação da resposta do fenômeno observado. Poder-se-ia dizer que o aluno meramente reproduziu o que observou na bancada virtual, contudo, há evidências de aquisição de novas representações mentais pela análise da explicação do estudante, como podemos observar.

Analisando o raciocínio do A1 diante das respostas dos questionamentos relacionados ao experimento da fenda dupla de Young, verifica-se a mesma interpretação para fótons e elétrons emitidos pela fonte. Em ambas as situações, o aluno desenha um padrão de interferência no anteparo, interpretando o fóton e o elétron com comportamento ondulatório.

A1: [...] pra analisar, eu imagino ele só **como uma onda**, o fóton, uma onda que vai ser emitida aqui da fonte né; quando ela chegar na primeira barreira, ela vai passar pelas duas fendas, e depois que elas passarem elas vão formar uma nova onda com as mesmas características da primeira, aí depois quando elas incidirem no anteparo, vai ter esses pontos de máximo e mínimo que da fenda 1 e da fenda 2 vão se coincidir os dois por terem as mesmas características da onda, o ponto máximo de um vai coincidir com o do outro e assim por diante né. [...] eu ia pensar no elétron mais ou menos do mesmo modo que eu pensei no fóton, como uma frente de onda.

Quando instigado a explicar a imagem formada no anteparo, caso a fonte emitisse bolas de gude (objetos macroscópicos), o aluno explica seu desenho representando duas linhas paralelas e horizontais, em que caracteriza as bolas de gude apresentando comportamento corpuscular.

A1: Eu acredito que ia ter só, aqui no anteparo duas linhas, duas linhas claras ou escuras, onde essas bolas de gude iam (Figura 22-I) bater depois que elas passassem na fenda, mesmo que elas fossem emitidas pra qualquer direção (Figura 22-II) elas iam seguir só ... (Figura 22-III).

Figura 22 - (I) Aluno com as duas mãos paralelas representando bolas de gude incidindo nas duas fendas, (II) Duas mãos paralelas, mas distantes uma da outra, representando as bolas de gude após passarem pelas fendas, (III) Mãos paralelas representando o local em que as bolas de gude tocam o anteparo de observação.



Fonte: A pesquisa.

Assim, A1 pensa no fóton e no elétron com comportamento corpuscular, mas só quando esses estão “isolados”, ou seja, sem observá-los em algum experimento. Quando analisados “dentro” do interferômetro virtual e do experimento da fenda dupla de Young, o mesmo os interpreta com comportamento ondulatório. Sendo assim, o aluno modifica seu *driver* e passa a visualizar o fóton e o elétron como onda para explicar (resolver) a situação-problema.

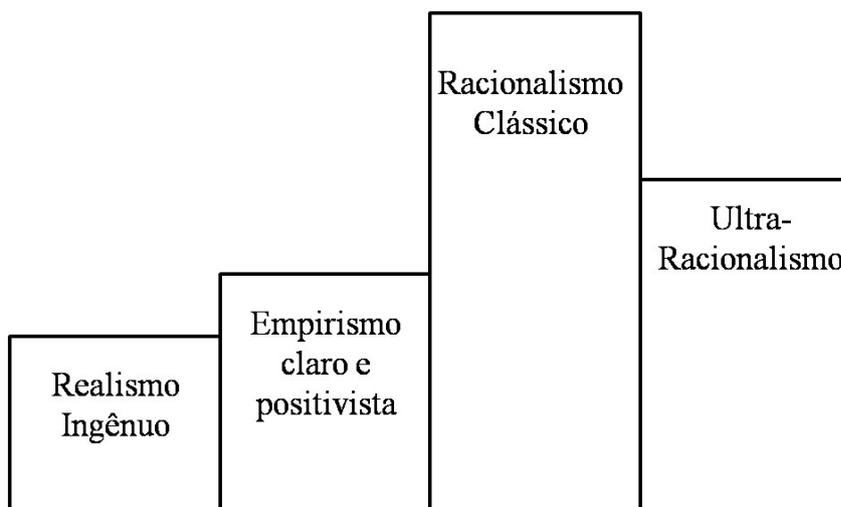
Analisando o raciocínio e a interpretação averiguada após a utilização dos *softwares*, traçaremos o perfil epistemológico do estudante em relação à noção da dualidade onda-partícula. Quanto às *atitudes epistemológicas*, Bachelard (1991) estabelece o realismo e o positivismo como sendo as duas fundamentais. Dessa forma, pode-se caracterizar uma interpretação (ainda não consolidada) Dualista Positivista, manifestada pelo A1, pois, conforme o experimento, o estudante pode utilizar uma descrição ondulatória ou uma corpuscular para o objeto quântico, mas nunca ambas, ao mesmo tempo.

### **6.2.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A1**

Por meio dos dados coletados dos questionários e entrevista, indicadores que são utilizados para esboçar o perfil epistemológico acerca da noção da dualidade de A1, emergem à medida que a interpretação do aluno diante dos fenômenos observados, bem como as suas representações e imagens mentais vão sendo percebidas e examinadas.

Seguindo o exemplo de Bachelard (1991), será primeiramente apresentado o diagrama esboçando as tendências filosóficas do indivíduo, configurando seu perfil epistemológico. Em seguida, apresentam-se as justificativas para determinada construção espectral filosófica.

Figura 23 - Perfil epistemológico do A1 acerca da noção pessoal da dualidade.



Fonte: A pesquisa.

Lembrando que no eixo das abcissas são indicadas as filosofias sucessivas e no eixo das ordenadas um valor que corresponde à frequência efetiva com que tal filosofia é expressada por A1, a respeito da sua noção da dualidade. Dentre as quatro principais filosofias apresentadas no gráfico, a visão racionalista clássica destaca-se, aparecendo com maior influência na construção da noção da dualidade.

Esse destaque deve-se à compreensão apresentada por A1 diante dos fenômenos observados nas bancadas virtuais, nas quais são testemunhadas fundamentações teóricas clássicas utilizadas pelo aluno para explicar, por exemplo, os padrões de interferência formados no anteparo, dirigindo-se à teoria ondulatória clássica ao citar as diferenças de fases entre as frentes de onda, tanto no IMZ como na dupla fenda. Explicação essa resultante da imaginação de A1 para a mudança do comportamento dos objetos quânticos, da sua visão corpuscular para a ondulatória. Portanto, a teoria utilizada ao descrever a origem dos pontos de “*máximo e mínimo*” (A1) converge à postura racionalista clássica.

Já a postura filosófica menos presente é a representada pelo realismo ingênuo, sendo esse o pensamento mais primitivo do indivíduo. É manifestado, por exemplo, nas representações do aluno para os objetos quânticos, como a imagem de “*uma esfera brilhante*” para o *fóton*, associando, possivelmente, esse brilho da esfera ao produzido pelo aquecimento dos filamentos ou gases das lâmpadas.

As filosofias que representam o empirismo claro e positivista e o ultra-racionalismo permeiam-se entre si e revelam-se com intensidades próximas nesse perfil. A postura empirista e positivista aparece com a necessidade do aluno em experimentar e observar

(realizar uma “medição”) em determinadas situações, para que, então, possa averiguar e utilizar determinado comportamento da luz (e elétrons, por exemplo) para interpretar e explicar determinados desdobramentos dos fenômenos. Portanto, como consequência dessa conduta, o A1 afirma não saber a natureza da luz e objetos quânticos sem antes analisá-los em situações específicas, dessa forma sua resposta estará vinculada à determinadas condições de “contorno”.

Neste seguimento, o aluno mostra consciência a respeito da dualidade apresentada pelos objetos quânticos, afirmando interpretá-los ora como onda (dentro do *setup* experimental) e ora como partícula (isolado). Este grau de pensamento encaixa-se na postura ultra-racionalista – mesmo que de forma incipiente - tendo em vista os obstáculos epistemológicos superados em sua fase de formação, sendo essa uma interpretação oriunda da “Física Moderna e Contemporânea”. Essa filosofia não recebe maior representatividade pelo fato, por exemplo, de o aluno não prever em seu guia de atividade o padrão formado no anteparo do IMZ quando a fonte opera em regime monofotônico, sendo que em seu pós-teste a resposta para o mesmo questionamento condiz com o resultado apresentado pelo *software*. Possivelmente esta evolução na concepção do fenômeno é consequência da manipulação das ferramentas hiperculturais propostas.

O esboço da análise filosófica espectral permite determinar como as diversas filosofias relacionam-se com o conceito da dualidade. O perfil epistemológico de A1 condiz com a interpretação privada (ainda não consolidada) Dualista Positivista. Os *drivers*, imagens mentais e as representações utilizadas e detectadas pelo aluno permitiram o esboço filosófico considerado primário no indivíduo, formando uma conduta que o guiará em determinadas interpretações para fenômenos e conceitos específicos.

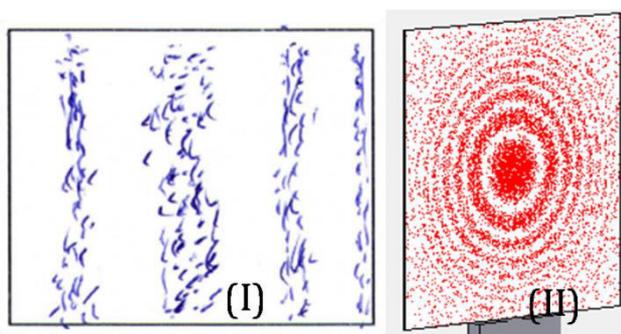
É importante ressaltar que o perfil epistemológico “[...] deve sempre referir-se a um conceito designado, de ele apenas ser válido para um espírito particular que se examina num estádio particular da sua cultura” (BACHELARD 1991, p.25).

### 6.3 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A2”

Observando o raciocínio do A2, verificamos que o mesmo interpreta o fóton com comportamento ondulatório ao passar pelo interferômetro. Apesar dessa interpretação, ele afirma não imaginar o fóton como uma onda, sua imagem mental referente ao fóton é de uma partícula. A explicação para seu desenho no pós-teste (Fig. 24-I), representando o padrão de interferência, é a de falta de informação referente ao caminho tomado pelo fóton após a

interação com o primeiro espelho semi-refletor. Portanto, se os detectores fossem acionados no *software A*, o padrão observado no anteparo cintilante mudaria, o caminho percorrido pelo fóton seria sabido e a imagem de interferência no anteparo seria destruída.

Figura 24 - (I) Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste. (II) Imagem fornecida pelo *software* ao longo da simulação.



Fonte: A pesquisa.

A2: [...] então, como a gente **não tem muita informação do caminho**, eu imaginei que ele teria um **comportamento mais ondulatório**, aí eu fiz tipo uma figurinha de interferência, aqui com uma concentração mais no meio. [...] Olha, tu olhando no anteparo parece que ele se divide, porque, enfim, como tu não sabe nem se é a esquerda ou a direita que ele tomou, a imaginação é isso, mas eu acho que não é correto imaginar isso, ou ele tomou o caminho da esquerda ou da direita, eu acho que essa incerteza que tu tem ali de não saber o caminho é que faz com que ele tenha esse comportamento mais **ondulatório**. [...] a imaginação mais fácil é imaginar que ele se reparte em dois, é, mas isso não é correto, pensar isso, pelo que eu aprendi.

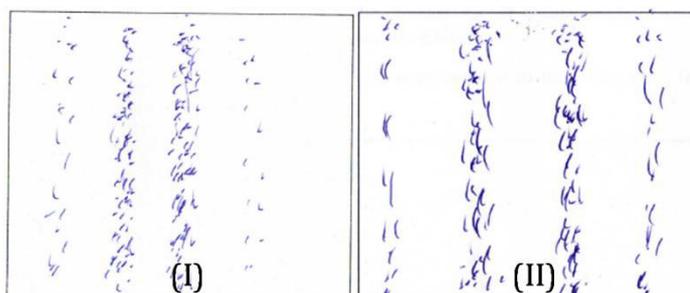
O desenho efetuado pelo aluno e o exposto pelo *software* (Fig. 24-II) não são idênticos, mas representam o mesmo fenômeno físico, ou seja, ambos caracterizam uma figura de interferência. A opção tomada pelo aluno em apresentar um padrão de interferência com traços desenhados na vertical pode dever-se às imagens visualizadas no anteparo de observação da bancada virtual, que reproduz o arranjo experimental da dupla fenda. Claramente o estudante relacionou os dois experimentos em uma única categoria, reconhecendo que em ambos os padrões de interferência, circular ou em faixas, há a possibilidade de leitura por meio de um único conceito.

Diante da fala do aluno, percebe-se um obstáculo epistemológico que dificulta a alternância e o surgimento de *drivers* que caracterizem o fóton com comportamento ondulatório. Ele afirma ser mais fácil imaginar o fóton como frente de ondas para explicar o padrão de interferência, pois as frentes de onda se encontram no segundo espelho semi-refletor, em fases distintas. Porém, o estudante permanece com uma imagem corpuscular para

o fóton, não conseguindo alterar seus *drivers* para a resolução e explicação do fenômeno. Essa resistência na modificação dos *drivers* é devida ao instinto conservativo do aluno, termo utilizado por Bachelard (1996) para descrever um obstáculo epistemológico. Isso, visto que “[...] chega o momento em que o espírito prefere o que confirma seu saber àquilo que o contradiz, em que gosta mais de respostas do que de perguntas. O instinto conservativo passa então a dominar, e cessa o crescimento espiritual” (BACHELARD, 1996, p. 19).

Analisando o experimento da dupla fenda de Young (*software B*) com a fonte emitindo um feixe luminoso, o aluno opta por desenhar um padrão de interferência no anteparo de observação, tanto no pré-teste (Fig.25-I) quanto no pós-teste (Fig.25-II), os desenhos mantiveram-se semelhantes, como mostrado a seguir.

Figura 25 - (I) Imagem desenhada pelo aluno no pré-teste. (II) Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste.



Fonte: A pesquisa.

As justificativas escritas pelo aluno para a escolha dos desenhos no pré-teste e pós-teste foram respectivamente: “*Porque ele representa o comportamento ondulatório do fóton*” e “*Porque não sabemos a fenda que o fóton passou*”. Desse modo, A2 interpreta o feixe de luz como sendo composto por partículas, os fótons. No entanto, desenha um padrão representando o comportamento ondulatório para o conjunto de fótons, justificando sua resposta pela ausência de informação do caminho percorrido pelos fótons, não sabendo por qual das fendas os fótons atravessam antes de colidirem com o anteparo.

Já com a fonte em regime monofotônico, A2 também justifica seu desenho pela falta de informação em relação à fenda que é atravessada pelo fóton.

A2: Como ali vai ser transmitido um fóton de cada vez, com certeza ou ele vai passar pela fenda 1 ou pela fenda 2, mas eu não tenho completa certeza se ele vai passar pela fenda 1 e não pela fenda 2 ou o contrário. Isso me dá uma certa **incerteza** e isso faz com que nós tivéssemos no anteparo uma figura mais parecida com o **comportamento ondulatório**.

O aluno continua com a imagem corpuscular do fóton, afirmando que o mesmo passa por uma fenda ou por outra, mantendo raciocínio semelhante ao interpretar os questionamentos referentes ao interferômetro virtual. Observa-se um bloqueio na alternância de imagens, não permitindo uma aquisição de *drivers* que possibilitem uma visualização ondulatória do fóton. Aparentemente, ao associar “incerteza” com o comportamento ondulatório observado, o estudante é levado a justificar o comportamento visualizado sem necessidade de uma troca nos seus *drivers*.

Modificou-se o arranjo experimental com a fonte, passando a emitir elétrons em vez de fótons, sendo um elétron emitido apenas quando o anterior já tiver atingido o anteparo. O aluno explica seu raciocínio ao ser questionado sobre o comportamento do elétron: “*Aí eu tenho certeza que não vai mudar muita coisa, o mesmo efeito que a gente tem pra fóton a gente tem pra elétron, a não ser que a gente saiba o caminho*” (A2).

Ao ser questionado sobre o padrão de interferência ocasionado pelos elétrons emitidos, o aluno faz uso da interpretação ondulatória ao explicar a imagem no anteparo, mas cita não ser correto esse raciocínio.

A2: Olha, pra entender talvez fosse mais fácil explicar que fosse o mesmo elétron passando pelas duas fendas ao mesmo tempo, enfim, um pouquinho antes, um pouquinho depois (Figura 26-I) que ficaria fora de fase (Figura 26-II), mas é incorreto pensar isso, eu sei disso.

Figura 26 - (I) As duas mãos representam frentes de onda, (II) Polegar e indicador de ambas as mãos no formato de duas semicircunferências, representando um vale e uma crista de onda.



Fonte: A pesquisa.

Quando cita a expressão “fora de fase”, o aluno está se referindo às ondas “*associadas ao elétron*”, expressão utilizada pelo próprio aluno.

Pesquisador: Mas o que ficaria fora de fase?

A2: A onda né, que é a onda associada ao elétron.

Pesquisador: Então, tu imagina o elétron como onda também?

A2: Sim, sim.

Pesquisador: Então, ele foge, quando tu analisa esse fenômeno, ele foge daquela representação que tu viu nos livros?

A2: Não, que nem eu disse, não deve virar onda, mas ele tem uma **onda associada a ele**.

A partir dessa fala, pode-se caracterizar uma interpretação Dualista Realista (em estágio incipiente) manifestada pelo aluno, pois o mesmo permanece com uma visão de uma partícula com trajetória bem definida (mas em geral desconhecida) e uma onda associada. O estudante afirma ser incorreto, teoricamente, imaginar o elétron se dividindo como se fosse uma onda, mas “é uma característica notável da Teoria Quântica que ela possa ser interpretada de diferentes maneiras, sendo que cada uma dessas interpretações é internamente consistente e, de modo geral, congruente com experimentos quânticos” (PESSOA JR, 2006, p.4). Portanto, verificamos que o aluno desconhece essas diferentes possibilidades de interpretação para o fenômeno. Esse fator também dificulta a aquisição e modificação de *drivers* importantes para a resolução e explicação do comportamento dual do elétron.

O aluno deixa claro que sua imagem em relação ao elétron é a representação de um corpúsculo (Fig. 27-I), oriunda dos modelos atômicos apresentados nos livros ao longo de sua vida acadêmica, junto com desenhos realizados pelos professores durante as aulas. Ao pensar no elétron com uma onda associada, ele imagina uma propagação do tipo senoidal, mas deixa claro não imaginar uma representação de uma partícula com um “*rabinho*” (Fig. 27-II), pois se lembra de uma aula em que seu professor enfatizou a não imaginação dessa representação. Esta recordação relatada pelo aluno indica que o mesmo tinha uma interpretação dualista incipiente aparentemente confirmada, visto que o processo de ensino visivelmente utiliza (também) dessa representação.

Figura 27 - (I) Ambas as mãos representando uma esfera, (II) Indicador da mão direita em movimento oscilatório, representando uma onda senoidal.



Fonte: A pesquisa.

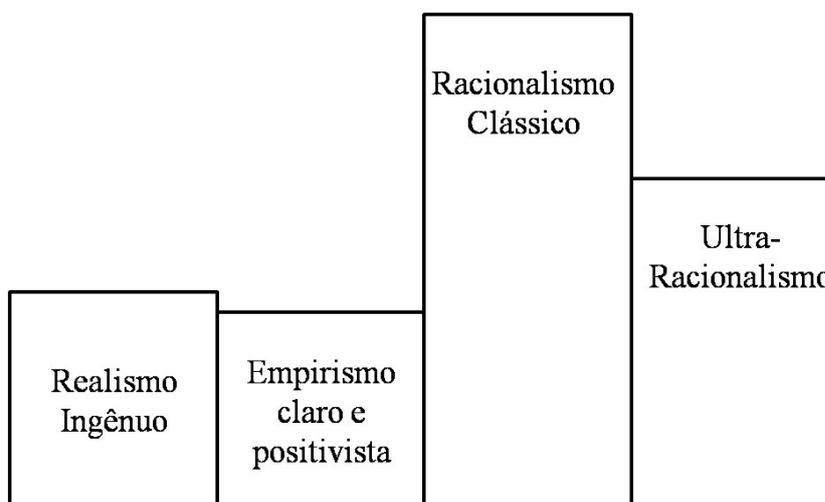
O A2 utilizou *drivers* psicofísicos e culturais oriundos de livros e aulas ao longo de sua vida para explicar e resolver as questões sobre dualidade onda-partícula. Esses *drivers* foram sendo adquiridos durante anos, criando uma resistência e um bloqueio epistemológico

para novas aquisições de *drivers* hiperculturais que possam confrontar suas ideias principais. Devido a isso, o aluno continua com uma visão corpuscular, tanto do fóton quanto do elétron, sentindo-se desconfortável e sem argumentos fundamentados para mudar sua interpretação e seus *drivers* diante de situações que apresentem fenômenos de interferência e difração para o fóton e o elétron.

### 6.3.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A2

Após a investigação da interpretação, *drivers* e imagens mentais utilizadas pelo estudante para resolver e entender os fenômenos visualizados nas ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais e nos questionários pré e pós-teste, apresenta-se a seguir o esboço do perfil epistemológico acerca da noção da dualidade do A2.

Figura 28 - Perfil epistemológico do A2 acerca da noção pessoal da dualidade.



Fonte: A pesquisa.

O gráfico construído mostra que o racionalismo clássico é a filosofia com maior representatividade na formação da noção da dualidade do A2, acompanhada, em segundo plano, pela atitude ultra-racionalista, que também ganha destaque na construção da compreensão sobre o tema.

O racionalismo clássico desponta na interpretação dualista realista exibida pelo aluno ao longo das atividades. Alegando maior facilidade em explicar o comportamento ondulatório do elétron e do fóton - que na concepção do aluno são considerados partículas -, A2 utiliza a teoria ondulatória clássica ao esclarecer os padrões de interferência vistos no anteparo. Essa

postura conecta-se com o racionalismo clássico presente em seu perfil, filosofia reforçada com a lógica quântica expressada pelo aluno ao dar a primeira explicação valendo-se da falta de informação do caminho (no IMZ) e da Fenda (no AEDF) percorridos pelo fóton, tal raciocínio apenas é reproduzido, mas não compreendido. Por esse motivo, A2 pondera ter maior compreensão imaginando uma onda associada aos objetos quânticos. Como já mencionado, o aluno afirma ser mais “fácil” explicar os fenômenos considerando o elétron e fóton com comportamento ondulatório, no entanto, garante que esse raciocínio é incorreto. Essa é uma evidência da falta de conhecimento das diversas interpretações da MQ, em especial a ondulatória de Schrödinger.

O ultra-racionalismo, ainda que incipiente em sua atitude, mostra a consciência do A2 para a dualidade dos objetos quânticos. O aluno afirma ser mais confortável explicar a dualidade do fóton e do elétron nos experimentos do IMZ e da Dupla fenda, com ambos os objetos quânticos possuindo ondas a eles associadas, sendo que, pela falta de conhecimento das principais interpretações da MQ, o aluno considera esse raciocínio como sendo incorreto “cientificamente”.

O empirismo claro e positivista e o realismo ingênuo contribuem em menor frequência para a noção do aluno. Primeiramente, tendo em vista a postura realista observada ao longo dos argumentos apresentados por A2, a necessidade da experimentação torna-se suplementar e não determinável para a compreensão do fenômeno, já que o seu parecer quanto à natureza dos objetos quânticos e da luz está tomado.

As representações e imagens mentais, reproduzindo sua concepção em relação ao fóton e elétron, podem caracterizar sua parcela que define o realismo ingênuo como terceira filosofia com maior representatividade no esboço do perfil epistemológico de A2. Mesmo que oriundas de sua vida acadêmica inicial, tais representações, como a de uma esfera para o elétron, são cruas e podem ser consideradas ingênuas. Outro exemplo é o da imagem mental do estudante para a onda associada aos objetos quânticos, na qual o elétron ou o fóton possuem um rabinho representando a sua componente ondulatória. Essa representação é evidenciada como incorreta pelo aluno que utiliza como referência a fala de seu professor em sala de aula. Portanto, o aluno não se permite utilizar explicitamente tal imagem mental. Desta forma, verifica-se que as imagens mentais do A2 estão populadas de imagens do realismo ingênuo.

Assim, ainda que de maneira superficial, construiu-se o esboço do perfil epistemológico do A2, determinando possíveis evidências de como as diversas filosofias relacionam-se com o conceito da dualidade.

Em seguida, serão apresentados os resultados e a análise do Aluno 3.

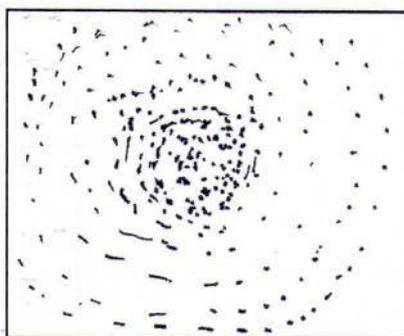
#### 6.4 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A3”

Os primeiros questionamentos foram voltados aos fenômenos vinculados e observados por meio do IMZ. Ao explicar o caminho percorrido pelo fóton no interferômetro, desde a fonte de emissão até o anteparo de observação, o aluno começa a expressar a sua interpretação quanto ao comportamento do fóton. O mesmo inicia seu raciocínio afirmando que imagina o fóton sendo dividido ao encontrar o primeiro espelho semi-refletor: “[...] *esse anteparo (espelho semi-refletor) é pros dois lados, vai refletir metade dos fótons para um lado e metade pro outro*” (A3).

Dando sequência à sua explicação, o aluno fala em imaginar o segundo espelho semi-refletor unindo os fótons anteriormente separados: “[...] *metade vem por um lado, metade vem por outro, e lá em cima eles vão se unir. No caso, eles vão se juntar os dois e vão chegar no anteparo*” (A3). Após essa explicação, o aluno é questionado se a sua explicação era para um fóton individual, ou seja, se era um fóton dividindo em dois ou ele estava imaginando vários fótons. Ele responde dizendo: “[...] *vários fótons, um vai para um lado o outro vai para o outro*” (A3).

Para explicar o padrão de interferência formado no anteparo (Fig. 29), o aluno imagina o segundo espelho semi-refletor canalizando os fótons. Nas próprias palavras do aluno, “[...] *chegam no anteparo em vales e picos*”, citando, portanto, características ondulatórias, como a interferência construtiva e destrutiva, responsáveis, na sua opinião, pelos pontos claros e escuros (comportamento ondulatório) observados no anteparo cintilante.

Figura 29 - Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste.



Fonte: A pesquisa.

Seguindo a conversa, o aluno ao ser questionado quanto à sua imaginação sobre o fóton isolado, sem o mesmo estar presente em aparatos experimentais, responde imaginar “o formato de uma partícula né, uma bolinha redonda” (A3).

Figura 30 - A3 representando o formato de um fóton, por ele imaginado.



Fonte: A pesquisa.

Nota-se que o aluno iniciou seu raciocínio com o intuito de explicar a trajetória com a fonte em regime monofotônico, mas o mesmo explica a trajetória de vários fótons passando pelo interferômetro. Visto que o discente necessita imaginar vários fótons para explicar o comportamento ondulatório, pois, se ele imaginar apenas um único fóton, a representação que surge é a de um corpúsculo clássico, e, em sua ideia, apresentaria um comportamento corpuscular no anteparo.

Analisando o raciocínio do A3 diante das respostas aos questionamentos relacionados ao experimento da dupla fenda, a mesma interpretação e explicação para o comportamento do fóton é dada para o elétron. Em ambas as situações, com a fonte emitindo fótons e elétrons, o aluno os interpreta como onda.

A3: [...] Conforme a frequência, enfim... O comprimento de onda dele, se bater com o comprimento de onda... Com o comprimento, enfim, dessas fendas, eles vão atravessar e aí vão se chocar no anteparo.

Pesquisador: E qual seria o padrão observado no anteparo? O desenho observado no anteparo seria um desenho característico de que?

A3: Um desenho característico de comportamento ondulatório.

Pesquisador: E qual seria o padrão observado no anteparo? O desenho observado no anteparo seria um desenho característico de que?

A3: É um comportamento de onda... De vale, que eu tinha falado antes, né... De vale e pico, enfim, que vai definindo.

No entanto, a dificuldade em analisar o arranjo experimental com a fonte operando em regime monofotônico permanece (a exemplo do IMZ), uma vez que A3 responde a alternativa C (Fig. 31) na questão do pós-teste que aborda o AEDF, a qual pergunta a imagem formada no anteparo cintilante após algumas horas da fonte operando em regime monofotônico.

Figura 31 - Imagem que representa a alternativa C, escolhida como resposta.



Fonte: A pesquisa.

A compreensão ondulatória para o comportamento do elétron, por exemplo, é testemunhada no diálogo a seguir:

Pesquisador: Isso. Se a fonte estivesse emitindo elétrons, um elétron de cada vez, quero que tu me explique toda trajetória e o que tu observou no anteparo.

A3: Se for analisar do ponto de vista ondulatório, ele terá o mesmo comportamento do fóton.

Pesquisador: Por quê?

A3: Porque ele também vai ter um comprimento de onda, ele também vai ter uma frequência de oscilação, e... automaticamente tudo que tem uma frequência de oscilação tem o comprimento de onda.

Pesquisador: Tá, e as duas fendas, elas são fundamentais para que haja esse comportamento ondulatório no anteparo?

A3: Sim.

Pesquisador: Ou se eu tirar as duas fendas o comportamento ondulatório vai ser observado da mesma forma?

A3: Não. As fendas vão ser... Vão ser determinantes em função do comprimento de onda, né.

Pesquisador: E o que que elas fazem com o elétron? Tu consegue imaginar qual essa interação do elétron com as fendas?

A3: O que eu entendo é que os elétrons que vibram no comprimento de onda da fenda, eles conseguem atravessar a fenda.

Pesquisador: ‘Vibram’, me explica um pouquinho sobre ‘vibram’.

A3: Na realidade o que cada elétron... Se tu analisar pelo efeito de... partícula, né, cada elemento tem um comprimento de onda, né, associado.

Julga-se que essa opinião se deve ao fato de o aluno já ter visto no estudo da óptica a análise com enfoque ondulatório para o experimento da fenda dupla, acrescentando em seu raciocínio uma associação entre o objeto quântico e uma onda. Isto é, teoricamente, era de seu conhecimento o surgimento do padrão de interferência. Entretanto, o estudante não apresenta conhecimentos relacionados à possibilidade de destruição do padrão de interferência e o surgimento de um borrão, caracterizando o comportamento corpuscular do fóton e do elétron, quando se é sabida a fenda pela qual o objeto quântico atravessou.

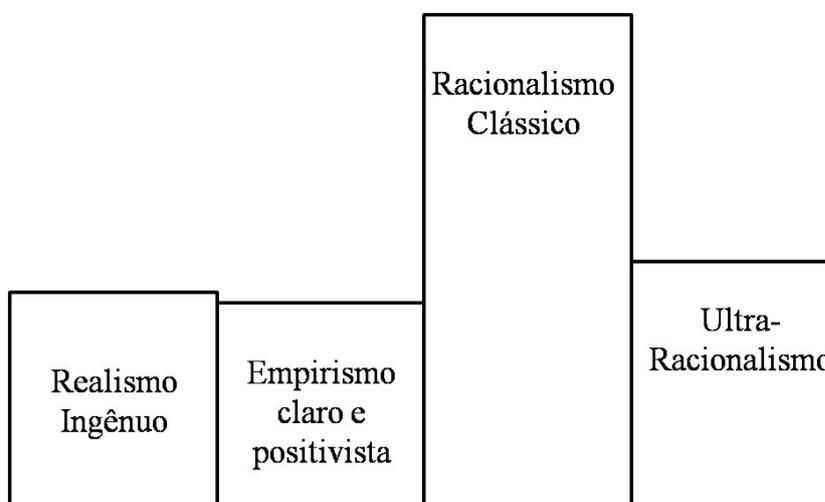
Analisando o raciocínio e a interpretação averiguada após a utilização dos *softwares*, traçar-se-á o perfil epistemológico do estudante em relação à noção da dualidade onda-partícula do fóton e do elétron. Portanto, a interpretação que mais se adéqua ao raciocínio

utilizado pelo A3 é a interpretação (ainda não consolidada) Dualista Realista. O estudante, em diversos momentos remete o fóton e o elétron como partícula e como onda, associando uma onda aos objetos quânticos, ondas responsáveis pela interferência construtiva ou destrutiva.

#### 6.4.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A3

Após a apresentação dos argumentos utilizados pelo aluno para explicar o seu entendimento dos fenômenos estudados através dos *softwares*, será exibido a seguir o esboço do perfil epistemológico acerca da noção da dualidade do A3.

Figura 32 - Perfil epistemológico do A3 acerca da noção pessoal da dualidade.



Fonte: A pesquisa.

A filosofia que se mostra mais representativa na formação da noção do A3, a respeito da dualidade, é o racionalismo clássico. As outras três filosofias que complementam o perfil (o realismo ingênuo, o empirismo claro e positivista e o ultra-racionalismo) aparecem com intensidades semelhantes e com diferença significativa para o racionalismo clássico. As justificativas para essa escolha são apontadas na sequência.

O racionalismo clássico se sobressai em virtude das diversas explicações clássicas utilizadas pelo aluno. Ainda que o mesmo apresente consciência da dualidade da luz, algumas indecisões estão presentes e contribuem para o raciocínio clássico apresentado pelo estudante em alguns pontos, como: a dificuldade apresentada em explicar a sua interpretação dual para o fóton com a fonte em regime monofotônico, em ambas as bancadas virtuais; e a escolha pela alternativa incorreta na questão a respeito da dupla fenda em regime quântico no pós-teste,

que denunciam a postura clássica presente. A explicação utilizando a teoria ondulatória clássica é utilizada com maior frequência nas explicações para os fenômenos.

O ultra-racionalismo apresenta-se com uma diferença maior de intensidade para racionalismo clássico, o aluno apresenta uma interpretação dual para a luz e objetos quânticos. Os fundamentos utilizados, como a associação de uma onda ao elétron e fóton, são conjecturas modernas e que representam o ultra-racionalismo. A representatividade do ultra-racionalismo no perfil de A3 é significativamente menor quando comparada aos perfis de A1 e A2, isso pelo fato de o aluno não ter, até o momento, desenvolvido uma aceção mais consolidada na manipulação das leituras dos fenômenos quando a fonte – tanto no IMZ quanto no AEDF – opera em regime quântico.

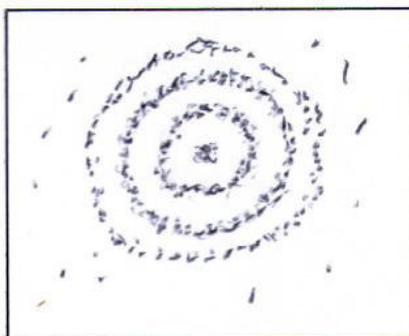
O realismo ingênuo e a atitude empirista e positivista apresentam-se também com intensidades semelhantes, o aluno adota uma postura realista e não utiliza com frequência os experimentos observados nas bancadas virtuais como importante na decisão de suas interpretações. A imagem mental responsável pela representação do fóton e elétron mostra-se ainda de maneira animista, contribuindo para a parcela do realismo ingênuo na construção espectral filosófica do A3 acerca da noção da dualidade.

Em seguida, serão apresentados os resultados e a análise do Aluno 4.

## 6.5 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS DO “A4”

Inicia-se a análise do raciocínio demonstrado pelo A4, verificando, primeiramente, o fenômeno no interferômetro virtual. O aluno considera o fóton com comportamento ondulatório, explicando o padrão de interferência por ele desenhado no pós-teste (Fig. 33), devido à falta de conhecimento do caminho tomado pelo fóton.

Figura 33 - Imagem desenhada pelo aluno no pós-teste.



Fonte: A pesquisa.

Após encontrar-se com o primeiro espelho semi-refletor do interferômetro, visto que as probabilidades de reflexão (percorrer uma das trajetórias possíveis) e de transmissão (percorrer a outra trajetória possível) do fóton são as mesmas, o aluno relata: *“como a gente desconhecia o caminho do fóton, então, mesmo sendo emitido um por vez, havia interferência, daí formava a figura de interferência”* (A4).

Figura 34 - A4 utilizando as mãos para simular as possíveis trajetórias do fóton, após a iteração com o primeiro espelho semi-refletor.



Fonte: A pesquisa.

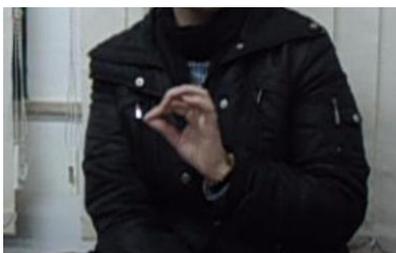
E, ao ser questionado quanto ao comportamento do fóton durante o seu percurso no interferômetro, o aluno descreve o seu raciocínio com as seguintes palavras: *“Eu imaginaria ele todo percurso como uma partícula, né, embora eu saiba que ele é, né, da dualidade onda partícula, mas para eu imaginar o experimento, eu visualizaria como o fóton fazendo o caminho como sendo uma partícula”* (A4).

Portanto, o aluno utiliza uma representação corpuscular para o fóton, mas acaba desenhando um padrão com particularidade ondulatória no anteparo, pois, teoricamente, tem o conhecimento do comportamento dual do fóton, possuindo, dessa forma, a previsibilidade do padrão formado no anteparo.

A4: Pra eu imaginar, eu imaginaria ele todo percurso como uma partícula, embora eu saiba que ele é da dualidade onda-partícula e tal. Mas pra eu imaginar o experimento, eu visualizaria como o fóton fazendo o caminho como ele sendo uma partícula.

O aluno também remete a uma partícula sua imaginação para um fóton isolado: *“uma partícula bem pequenininha... como se fosse um pontinho”* (Fig. 35).

Figura 35 - A4 utilizando o polegar e o indicador para representar o fóton.



Fonte: A pesquisa.

Analisando o raciocínio do A4 diante das respostas aos questionamentos relacionados ao experimento da fenda dupla de Young, verifica-se uma explicação semelhante àquela apresentada para o interferômetro, ou seja, a interpretação do comportamento para os fótons e elétrons emitidos pela fonte é a mesma.

A4: Então, imagina-se que ele passa por uma única fenda, mas a gente não sabe qual o caminho, que daí fica aquela questão da incerteza, e quando ele passa, ele tem um comportamento de onda, se não tiver nenhum observador, né. Se tiver um observador, daí perde o, a propriedade de onda, de interferência.

Assim, o aluno pensa no fóton e no elétron como partículas, os interpretando com o comportamento corpuscular em todo o percurso do aparato experimental, mas, no anteparo, o aluno desenha um padrão de interferência, sendo esse um fenômeno ondulatório, atribuindo à sua resposta a falta de informação da fenda pela qual o elétron (a mesma explicação é utilizada para o fóton no experimento da fenda dupla) passa. No entanto, o motivo do aparecimento do padrão de interferência não é convincente, o aluno não consegue explicar quais fatores causam a interferência do fóton, dizendo: *“ele (interfere) com ele mesmo, eu acho... Eu não sei por quê. Isso não ficou claro pra mim”*. Ainda em relação à escolha do desenho realizado no pós-teste, o aluno o justifica da seguinte maneira:

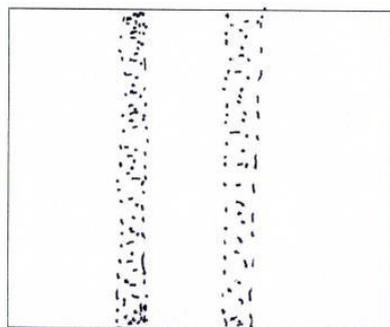
A4: Por causa da dualidade onda-partícula, mas, especificamente, assim, te dar uma explicação, não saberia. [...] Eu sempre imagino ele como uma bolinha, que tem propriedade de onda, mas como que acontece isso, eu não tenho essa clareza.

Caso um observador detectasse por qual das fendas o elétron passou, o padrão observado no anteparo cintilante mudaria, isto é, a imagem de interferência no anteparo seria destruída. Essa compreensão é expressada pelo aluno em seu discurso: *“A minha imaginação diria que ele passaria por uma das fendas. Na verdade a gente não tem certeza, porque se*

*botar um observador pra saber, daí o fóton vai se comportar exatamente como uma partícula. Ele perde toda propriedade de onda, né” (A4).*

Quando incentivado a explicar a imagem formada no anteparo, caso a fonte emitisse bolas de gude (objetos macroscópicos), o aluno explica seu desenho (Fig. 36), em que caracteriza as bolas de gude apresentando comportamento corpuscular.

Figura 36 – Imagem desenhada por A4 no pós-teste para representar um padrão corpuscular.



Fonte: A pesquisa.

Justificando o motivo de seu desenho, o aluno alega já ter observado esse arranjo experimental: *“ah, eu li. O professor já tinha explicado, na verdade, isso em aula. E depois no livro ‘Alice no País do Quantum’ tem uma figura, de tiro de bala de canhão, de bala de espingarda... E aí forma esse padrão aqui” (A4).* Essas referências ao livro e ao professor revelam os *drivers* psicofísicos e culturais utilizados pelo aluno para o entendimento e resolução do experimento em regime clássico.

Devido ao fato de o aluno já ter cursado uma disciplina que abordasse o comportamento dual do fóton e do elétron, os desenhos realizados nos anteparos no pós-teste estavam corretos. No entanto, o estudante não imagina o elétron em nenhum momento com comportamento ondulatório: *“Eu sempre imagino ele como uma bolinha, que tem propriedade de onda, mas como que acontece isso, eu não tenho essa clareza” (A3).* O seu *driver* de representação para as partículas quânticas continua inalterado. Por exemplo, o aluno alega a imagem do elétron como partícula, pois, em toda a sua trajetória acadêmica, ao estudar a eletricidade, sempre observou a representação de um elétron como uma esfera com um sinal negativo.

Neste seguimento, A4 é indagado a descrever como explicaria aos seus alunos em sala de aula o comportamento e a natureza dos objetos quânticos. E, assim, a mesma resposta é utilizada tanto para o fóton quanto para o e elétron:

A4: [...] eu tentaria explicar que ele é uma partícula, que também tem comportamento de onda, e tentaria explicar pelos experimentos, justificando por conta dos experimentos. Mas explicar sem falar nos experimentos, eu não saberia. Conceitualmente, eu não saberia.

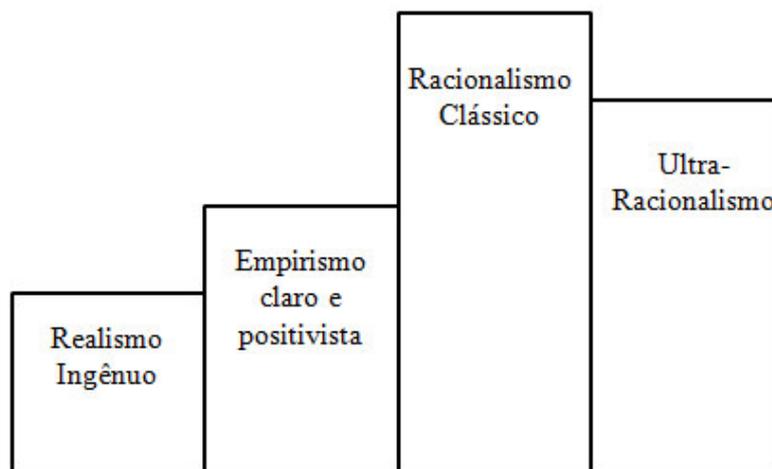
De acordo com a sua fala, o aluno faria uso dos experimentos para justificar os comportamentos, ora ondulatório ora corpuscular, do fóton e elétron, sentindo-se na necessidade da visualização de determinado fenômeno. Isto é, a partir dos arranjos experimentais a compreensão a respeito da dualidade seria construída.

Desta forma, pode-se caracterizar uma interpretação (ainda não consolidada) Dualista Positivista manifestada pelo A4, sendo que a Interpretação Corpuscular (realista), em menor frequência, também é manifestada pelo aluno, caracterizada pela interpretação implícita ao se usar a lógica quântica, que pôde ser constatada em trechos do raciocínio do aluno. Essas duas interpretações que emergem de maneira incisiva no discurso do aluno ajudam a caracterizar o perfil epistemológico-ontológico do mesmo para a noção da dualidade, que será exposto em seguida.

### **6.5.1 Esboçando o Perfil Epistemológico de A4**

Neste tocante, serão utilizados os *drivers*, imagens mentais e representações utilizadas pelo aluno durante a sua interpretação para os fenômenos estudados através das ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais para traçar o perfil epistemológico do A4 acerca da noção da dualidade.

Figura 37 - Perfil epistemológico do A4 acerca da noção pessoal da dualidade.



Fonte: A pesquisa.

O racionalismo clássico é a filosofia com maior destaque na compreensão do A4 acerca da dualidade, a atitude racional clássica manifesta-se em diversos pontos ao longo das explicações apresentadas pelo aluno. O arranjo experimental da dupla fenda em regime clássico é o experimento no qual A4 apresentou maior convicção em suas respostas, acessando seus *drivers* psicofísicos e culturais. O aluno fornece representações clássicas ao longo da exposição de seu raciocínio, imagina o fóton e, principalmente, o elétron como corpúsculos ao longo do IMZ e do AEDF, mas atribui uma propriedade de onda a esses objetos quânticos para justificar os comportamentos ondulatórios observados em algumas configurações dos *softwares*.

De acordo com o gráfico apresentado, o ultra-racionalismo é a segunda filosofia presente com maior intensidade no espírito do indivíduo acerca da sua compreensão da dualidade. A sua consciência, ainda que incipiente, a respeito do comportamento dual da luz e dos objetos quânticos, conecta-se à postura ultra-racionalista, formada com o conhecimento de diversos conceitos ao longo de sua jornada acadêmica.

O aluno menciona ao longo de sua entrevista conhecimentos sobre o princípio da incerteza e a influência do observador (medida) nos experimentos em regime quântico, o que, em uma possível comparação com a representatividade desta filosofia nos perfis apresentados anteriormente (de A1, A2 e A3), contribui para a atribuição aparente a A4 do maior avanço conceitual na compreensão dos fenômenos estudados através das ferramentas hiperculturais.

O empirismo claro e positivista é a terceira filosofia com maior representatividade. Essa atitude é observada na necessidade do aluno em utilizar os experimentos para definir as

suas interpretações a respeito da dualidade, sendo o empirismo, segundo o próprio aluno, fundamental para a sua metodologia de abordagem da dualidade, enquanto futuro professor da Física Moderna e Contemporânea. O realismo ingênuo é a atitude filosófica de menor intensidade, testemunhado nas representações dos objetos quânticos e na maneira como os mesmos são vinculados aos aparatos experimentais virtuais, isto é, uma definição animista acerca da imagem do fóton e elétron.

Assim sendo, esta análise filosófica espectral converge para as interpretações Dualista Positivista e Corpuscular (em menor veemência), verificadas ao longo dos dados levantados e investigados.

## 6.6 SÍNTESE DA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio dos dados interpretados em *drivers* e imagens mentais obtidos ao longo das atividades, em especial na etapa de entrevistas conduzidas pelo protocolo *Report Aloud*, pode-se identificar as interpretações e elaborar a construção dos esboços dos perfis epistemológicos dos estudantes acerca da dualidade.

Observou-se que os alunos 1 e 4 manifestam, ainda que de maneira incipiente, a interpretação dualista positivista. Ambos mostram ter consciência sobre o comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética. A1 imagina os objetos quânticos como corpúsculos que, ao serem investigados nos aparatos experimentais do IMZ e da dupla fenda, dividem-se em frentes de ondas que irão resultar nos fenômenos de interferência e difração. Ou seja, ocorre uma alternância de *drivers* relacionados aos objetos quânticos, o aluno busca o seu entendimento acerca da natureza do fóton e do elétron fundamentado empiricamente.

A4 se posiciona de maneira semelhante ao mencionar necessidade no uso dos experimentos para justificar os comportamentos ora ondulatório, ora corpuscular do fóton e elétron. Diante disso, o aluno afirma imaginar os objetos quânticos como partícula, mas com propriedades ondulatórias, sendo o arranjo experimental determinante para designar o comportamento/natureza do fóton e do elétron.

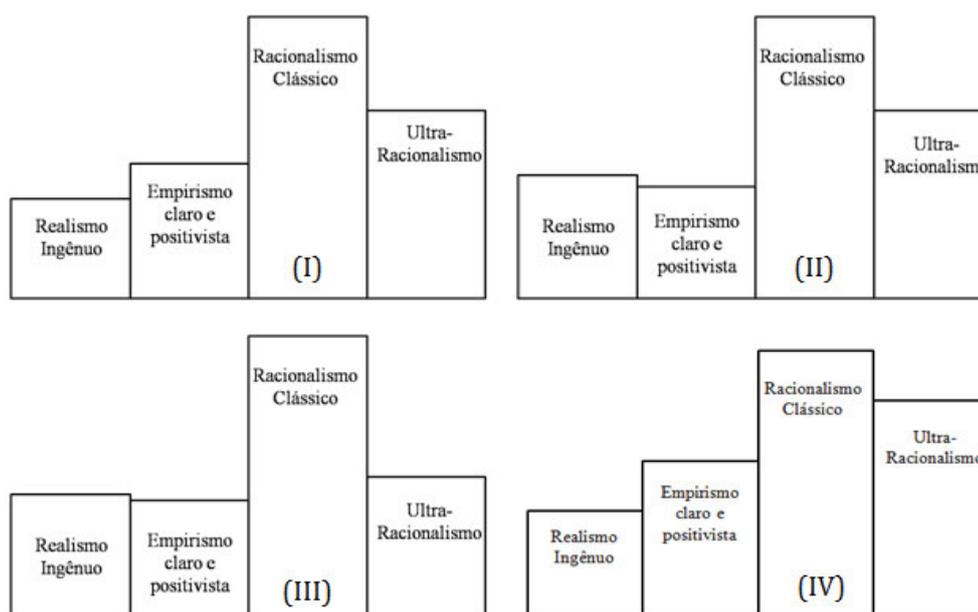
Já, os alunos 2 e 3 manifestam, também de maneira incipiente, a interpretação dualista realista. Ambos entendem a possibilidade dos objetos quânticos se comportarem ora como onda e ora como partícula, passando a associar uma onda ao fóton e elétron. A2 associa uma onda ao objeto quântico, pois não se sente confortável em explicá-lo com comportamento ondulatório, tendo em vista sua imaginação basicamente corpuscular, ou seja, resiste à alternância de seus *drivers*. Cabe salientar que, dentro da interpretação dualista realista,

ambos os *drivers* de comportamento ondulatório, como corpuscular, co-existiriam sem alternância.

A3 apresenta dificuldades em interpretar os experimentos em regimes monofotônicos e mono eletrônicos com sua imagem essencialmente corpuscular para os objetos quânticos. Associa a eles, então, uma onda para explicar os padrões de interferência formados no anteparo. No entanto, ambos aparentam desconhecer a interpretação dualista realista baseada nas ideias de De Broglie e Bohm, já que não mencionam fatores importantes como, por exemplo, as características da “onda piloto” e os fatores que determinam a probabilidade de uma partícula se propagar em certa direção.

Em relação aos perfis epistemológicos, os esboços apresentam-se a seguir para que o leitor possa comparar as alturas relativas das colunas que representam as filosofias em cada perfil:

Figura 38 - (I) Perfil epistemológico do A1. (II) Perfil epistemológico do A2. (III) Perfil epistemológico do A3. (IV) Perfil epistemológico do A4.



Fonte: A pesquisa.

Diante deste cenário, considera-se o aluno 4, em comparação com os demais alunos da investigação, como o estudante com maior atitude ultra-racionalista manifestada ao longo dos questionamentos. De acordo com o teor das respostas de A4, observa-se maior referência aos fenômenos fundamentais da MQ presentes na dualidade, como a menção, ainda que inicial, do princípio da incerteza e a influência do observador (medida). As propriedades ondulatórias acrescentadas às suas imagens corpusculares para os objetos quânticos são influenciadas pelos

seus *drivers* culturais adquiridos pela leitura do livro “Alice no país do quantum”, do autor Robert Gilmore (1998), além das principais influências compostas pelas aulas ao longo do curso de Licenciatura em Física e, também, pela utilização das ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais durante a proposta de atividades desta pesquisa. O uso de artefatos culturais (o livro) aparentemente foi um fator determinante para a emergência e consolidação da zona de perfil ultra-racionalista, visto que o aluno 4 faz referências constantes ao livro durante a entrevista, muito provavelmente recordando *drivers* culturais durante o processo de explanação de suas respostas aos problemas propostos.

Olhando para as colunas que representam o racionalismo clássico, verifica-se essa filosofia como a mais representativa na aceção dos conceitos acerca da dualidade pelos quatro alunos participantes da investigação. Acredita-se que essa filosofia recebeu maior destaque porque os alunos, ao longo de suas trajetórias acadêmicas, se deparam com fenômenos seguidos de explicações fundamentadas no racionalismo clássico. Sendo assim, essa filosofia desenvolve-se com maior frequência no espírito científico do indivíduo.

O resultado em que o racionalismo clássico supera o ultra-racionalismo em frequência nos perfis epistemológicos é entendido como natural. Esse resultado converge com as ideias de Bachelard (1991), apontando o ultra-racionalismo como o pensamento mais sofisticado, o pico da evolução filosófica, sendo o ponto de chegada de um percurso científico que se inicia no realismo ingênuo. À vista disso, o ultra-racionalismo só consegue ser alcançado quando o indivíduo se apropria por completo de determinado conceito/conhecimento. Como o tema da dualidade ainda gera discussões no meio acadêmico e é abordado geralmente na fase final dos cursos de Licenciatura em Física, considera-se esperado que o aluno não apresente o ultra-racionalismo como filosofia de maior representatividade em sua atitude. O leitor poderá recordar que, pelo menos um teórico é categórico com relação à lentidão deste processo de consolidação conceitual. De acordo com Vergnaud (1996)<sup>23</sup>, o sujeito passa a apropriar-se de um conhecimento ao longo de vários anos, confrontando-se com situações problemas, adquirindo, assim, competências e concepções próprias.

O empirismo claro e positivista assume maior destaque nos perfis de A1 e A4 devido à necessidade e aos apontamentos para a utilização de aparatos experimentais para delegar a compreensão acerca do comportamento dos objetos quânticos. Neste tocante, A2 e A3 assumem uma postura realista e não manifestam explicitamente a necessidade de investigar

---

<sup>23</sup>A Teoria da Mediação Cognitiva é formada pela combinação de quatro referenciais teóricos, juntamente com a perspectiva do processamento extracerebral, e um destes referenciais é o da Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud.

determinadas configurações experimentais para, então, esboçar sua interpretação a respeito da natureza do elétron e do fóton.

O realismo ingênuo é a filosofia que se expressa de forma semelhante entre os perfis dos alunos. Em A1 e A4 é a que representa menor intensidade, e em A2 e A4 seu destaque está muito próximo ao do empirismo claro e positivista, constituindo as filosofias com menor contribuição na construção do conceito acerca da dualidade. O realismo ingênuo é observado nos discursos dos alunos quando os mesmos externalizam suas representações para os objetos quânticos, atribuindo formas geométricas e cores, por exemplo, concedendo características animistas aos fótons e elétrons. O realismo ingênuo como filosofia com menor influência nas concepções dos alunos também pode ser considerado um resultado natural, tendo em vista as ideias de Bachelard (1991), que consideram o realismo ingênuo, a filosofia que representa um pensamento mais primitivo e que antecede o estágio científico. Como os alunos estão em fase final de um curso superior, espera-se que o pensamento animista tenha sido superado aos poucos durante o processo acadêmico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta investigação teve seu início com o objetivo de utilizar bancadas virtuais como mediação hipercultural, no processo de construção de conhecimentos relacionados ao comportamento dual da matéria e da radiação eletromagnética. Investigando, portanto, quais imagens mentais e *drivers* de estudantes de física são adquiridos e/ou modificados após a utilização de ferramentas hiperculturais para, fazendo o uso dessa verificação, analisar as interpretações privadas acerca dos fenômenos quânticos e, desta forma, traçar o perfil epistemológico dos discentes diante da noção de conceitos relacionados à dualidade.

Para alcançar tal objetivo, buscou-se encontrar respostas para a seguinte questão norteadora da pesquisa: *Qual a relação entre o perfil epistemológico do estudante, suas imagens mentais e drivers modificados e/ou construídos após a utilização de experimentos virtuais de Mecânica Quântica?* Assim, a condução da investigação converge e culmina na tentativa de relacionar as imagens mentais e *drivers* dos alunos com as principais interpretações da MQ, a ponto de mapear as filosofias com maior destaque e influência no espírito do sujeito na construção de conhecimentos acerca da dualidade.

A metodologia utilizada, por meio da escolha da técnica *Report Aloud*, possibilitou a detecção das mudanças dos *drivers* sociais e psicofísicos já existentes na estrutura cognitiva do indivíduo. Dessa forma, foi possível investigar o raciocínio e as concepções dos estudantes diante dos fenômenos da dualidade que os *softwares* apresentam. O perfil epistemológico dos alunos pode ser traçado de acordo com as interpretações privadas, inferidas a partir dos *drivers* conceituais, manifestados durante as entrevistas, onde foram comparados com as quatro principais interpretações da TQ.

Os *softwares* utilizados neste trabalho, caracterizados como laboratórios virtuais (ou bancadas virtuais), apresentaram-se como processadores externos de informação, proporcionando aos alunos, por meio do guia de atividade baseado no P.O.E, a visualização e a análise do fenômeno dual da matéria e da radiação eletromagnética. No entanto, os *softwares* não se mostraram eficazes para uma nova aquisição de *drivers* microscópicos (que pudessem contribuir para o processamento imagístico cerebral), resultantes de uma ferramenta hipercultural. Para compreender o porquê, levantamos a hipótese de que os *softwares* utilizados não apresentam representações gráficas dos objetos quânticos utilizados: fóton ou elétron. Esta é uma das características (DOERR, 1997) dos “experimentos virtuais”, em

contraponto às “simulações conceituais”. Enquanto o segundo se permite apresentar representações conceituais utilizadas pelos cientistas – bem como o que ocorre macroscopicamente em um experimento<sup>24</sup> – o primeiro se limita a apresentar unicamente o que é observado em um experimento. Assim, as bancadas virtuais escolhidas apresentam apenas um padrão no anteparo, resultado da manipulação do aluno sobre o arranjo experimental virtual. Desta forma, as representações e *drivers* microscópicos já existentes acabam permanecendo não modificados, ou seja, o aluno faz uso de seus *drivers* psicofísicos e culturais para explicar o padrão formado no anteparo. Isto é, os *drivers* psicofísicos e culturais prevalecem no momento da resolução e explicação dos problemas.

De acordo com os fundamentos que compõem a TMC, pode-se considerar que ambos os *softwares* utilizados não são suficientes para a aquisição de representações e *drivers* que permitam maior alternância nas interpretações dos alunos quanto ao comportamento de objetos quânticos. Ou seja, como as bancadas virtuais utilizadas apresentam apenas os resultados dos experimentos de acordo com a manipulação do arranjo experimental pelo aluno, elas deixam uma lacuna interpretativa em aberto a respeito do comportamento e interação dos objetos quânticos com o experimento.

Segundo os esboços dos perfis epistemológicos, o aluno 4 atinge em maior frequência o pensamento ultra-racionalista. Uma hipótese atual para este desenvolvimento é a de que o aluno preenche a lacuna interpretativa deixada pelas bancadas virtuais com representações e *drivers* advindos da exploração destes problemas em uma mediação cultural, isto é, através do seu processamento extracerebral (cultural) realizado, por exemplo, com a leitura do livro “Alice no país do quantum”. Também pode-se registrar que as representações e *drivers* dos estudantes se modificam parcialmente com a interação com o experimento, com os problemas propostos e elementos psicofísicos, sociais e culturais. Contudo, dada a estabilidade destas imagens mentais (inadequadas) não há evolução nas suas representações e *drivers* e, conseqüentemente em sua interpretação privada do fenômeno quântico, que em todos os casos se assemelha, mas não é consistente com nenhuma das quatro interpretações categorizadas por Montenegro e Pessoa Jr. (2002).

Diante deste cenário, uma hipótese possível é a de que o processamento extracerebral em virtude da cultura, supera o processamento realizado pelas ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais utilizadas nesta proposta. Portanto, neste caso, a cultura acaba se tornando a principal influência no aumento da intensidade do ultra-racionalismo no perfil do

---

<sup>24</sup> Como visto, por exemplo, em Wolff (2015).

aluno acerca da noção da dualidade. É importante reforçar que isso acontece porque as ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais não fornecem ao estudante representações do que ocorre no mundo microscópico. Acredita-se, contudo, que a utilização de simulações conceituais, onde esses objetos quânticos são representados, possibilitará a aquisição de novas representações e *drivers*. Um dos grandes argumentos da escola imagística de funcionamento da mente é que representações são cruciais para o processamento cerebral, como já discutido, porque apresentam informação condensada no auxílio à cognição. A não presença de representações adequadas em nível microscópico pode, assim, estar impedindo uma evolução conceitual. Principalmente no que toca à teoria quântica, na qual apresenta diversas interpretações possíveis para um mesmo conjunto de fenômenos, é possível que fornecer representações e *drivers* microscópicos condizentes com estas diversas interpretações seja importante do ponto de vista didático.

Em termos de respostas nos pré e pós-testes, são averiguadas mudanças das interpretações dos alunos ao longo das suas explicações, possíveis contradições durante as argumentações, o que confirma a falta de certeza sobre uma explicação que possa ser tomada em seu raciocínio como correta para determinadas situações-problema. Diante deste cenário, pode-se entender essa alternância nas explicações, seguidas de erros conceituais para os fenômenos observados nos *softwares*, como uma falha no ensino da MQ, visto que a dualidade onda-partícula é um tema central e “básico”, e que talvez o experimento paradigmático mais importante a ser passado para os alunos de MQ seja o da dupla fenda para elétrons individuais (*software B*). Indo em contramão com as considerações de Montenegro e Pessoa Jr (2002), afirma-se que os cursos de Mecânica Quântica são excessivamente voltados para cálculos, dando pouca ênfase ao esclarecimento conceitual do assunto, não sendo vista como problemática a formulação matemática, mas, sim, o negligenciamento dos conceitos e questões interpretativas.

Após a identificação da importância do ensino da MQ, mantendo a preocupação na abordagem conceitual, não apenas nos processos de cálculos matemáticos, e também a crescente aparição das TIC, voltadas aos processos educativos, projeta-se dar sequência à investigação do tema, possivelmente sob a forma de um trabalho de doutoramento. Pretende-se pesquisar o desenvolvimento e a utilização de ferramentas hiperculturais em forma de simulações computacionais que preencham a lacuna representacional do comportamento do mundo microscópico em experimentos fundamentais da TQ, permitindo ao aluno observar as representações e *drivers* vinculados às principais interpretações MQ.

Neste tocante, sugere-se uma condução investigativa que busque responder se ocorre e como ocorre a evolução no perfil epistemológico de estudantes em fase final do curso de Licenciatura em Física acerca da noção de tópicos fundamentais da mecânica quântica, após a utilização de ferramentas hiperculturais em forma de bancadas virtuais, e hipermídias que forneçam representações microscópicas dos fenômenos observados.

Toma-se, desta maneira, como proposta de pesquisa na área de Ensino o estudo da forma de aprendizado quando se utiliza, por mediação, um mecanismo externo de processamento de informações – o computador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. R. Arguments concerning representations for mental imagery. **Psychological Review**, v. 85, n. 4, p. 249, 1978.

ANDRADE NETO, A. S. ; V. Engel . Uso de Simuladores no Ensino de Física: Um estudo da produção Gestual de Estudantes Universitários. **RENOTE. Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 10, p. 1001, 2012.

APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da Ciência: Filosofia e Prática da Pesquisa**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

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.

BACHELARD, G. **A Filosofia do Não - Filosofia do Novo Espírito Científico**. 5.ed. Lisboa: Presença, 1991.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

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.

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.

BELTRAN, M. H. R. (orgs.). **O saber fazer e seus muito saberes: experimentos, experiências e experimentações**. São Paulo: Editora Livraria da Física/EDUC/FAPESP, 2006.

BETZ, M. EM. Elementos de mecânica quântica da partícula na interpretação da onda piloto. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 4, p. 4310, 2014.

BETZ, M.; LIMA, I.; MUSSATTO, G. Dualidade onda-partícula: um objeto de aprendizagem baseado no interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 3501- 3509, 2009.

BOLDUC, E. et al. Fair sampling perspective on an apparent violation of duality. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.111 ,n.34,p. 12337-12341, 2014.

BUGELSKI, B. R. Words and things and images. **American Psychologist**, v. 25, n. 11, p. 1002, 1970.

ÇALISKAN, S.; SEZGIN, G. S.; EROL, M. Students understanding of some quantum physical concepts. **Latin American Journal of Physics Education**, v.3, n.2, p. 202-206, 2009.

CARVALHO, S. H. M. **Einstein – Uma Luz sobre a Luz. 2005**

Disponível em: <<http://fisica.cdcc.usp.br/Professores/Einstein-SHMCarvalho/Einstein-SHMCarvalho.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2015.

CASTRILLÓN, J.; FREIRE JR, O.; RODRÍGUEZ, B. Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, n. 1, p. 1505, 2014.

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.

DEMO, P. **Introdução à metodologia da ciência**. 2. ed.- 16. Reimpr. São Paulo: Atlas, 2008.

DIAS, V. S; MARTINS, R. A. Michael Faraday: o caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. **Ciência & Educação**, v.10 n.3, p.517-530, 2004.

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.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica – Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Tradução de Paulo Costa Ribeiro, Ênio Frota da Silveira e Marta Feijó Barroso. 13. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1979. 928 p. Título original: Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles.

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.

FEYNMAN, R.P.; LEIGHTON, R.B.; SANDS, M.. **Lições de Física - The Feynman lecture on Physics**. Porto Alegre: Bookman, v.3, 2008.

GARCÍA, L. O. et al. Planificando La enseñanza problematizada: elejemplo de la óptica geométrica em educación secundaria. **Enseñanza De Las Ciencias**, Madrid, v. 2, n. 25, p.277-294, 2007.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**.5. ed. São Paulo:Atlas, 2006.

GILMORE, R. **Alice no país do Quantum**. Trad. André Penido. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

GRECA, I. M. R. **Construindo Significados em Mecânica Quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de Física Geral**. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2000. 284 p.

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.

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 Ciencias** (En línea), v. 8, p. 52-61, 2013.

KOSSLYN, S. M. **Image and mind**. Harvard University Press, 1980.

LAGRECA, M. C. B. **Tipos de representações mentais utilizadas por estudantes de física geral na área de mecânica clássica e possíveis modelos mentais nessa área**. 1997. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 1997.

MAGALHÃES, D. S. F. **Estudo de Imagens por Dupla Difração com seleção de Luz Branca e elementos definidos bidimensionalmente**. 63 f. Dissertação (Mestrado em Física), Unicamp, Campinas, 2005.

MCKAGAN, S. B. et al. Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 4, p. 406-417, 2008.

MENZEL R.; et al. Wave-particle dualism and complementarity unraveled by a different mode. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 109(24): 9314–9319, 2012.

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.

MÜLLER, R.; WIESNER, H.. Teaching Quantum Mechanics on a introductory level. **American Journal of Physics**, 70, 3, 200-209, 2002.

MOREIRA, M. A. **Investigación em Educación em Ciencias: Métodos Cualitativos**, Texto de Apoyo nº 14, Programa Internacional de Doctorado em Enseñanza de las Ciencias, Universidad de Burgos, España, 2002.

MOREIRA, M. A. Modelos mentais. **Investigações em ensino de ciências**, v. 1, n. 3, p. 193-232, 1996.

NETO, J. S.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. O tema da dualidade onda-partícula na educação profissional em radiologia médica a partir da simulação do interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 1401, 2011.

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.

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.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Desenvolvimento de um software para o ensino de fundamentos de física quântica. **A Física na Escola**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 22-25, 2006.

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.; RICCI, T. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. **Ciência e Educação**, v.10, n.2, p. 235-257, 2004.

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.

OTERO, M. R.; MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. El uso de imágenes en textos de física para La enseñanza secundaria y universitaria. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 7, n. 2, p. 127-154, 2002.

OTERO, M. R. Psicología cognitiva, representaciones mentales e investigación em enseñanza de las ciencias. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 4, n. 2, p. 93-119, 1999.

PAIVIO, Allan. **Mental representations**. Oxford University Press, 1990.

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

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.1. 2006.

PESSOA JR, O. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Livraria da Física, v. 2, 2008.

PESSOA JR, O. Interferometria, Interpretação e Intuição: uma Introdução Conceitual a Física Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, 1997.

PIAZZA L. et al. Simultaneous observation of the quantization and the interference pattern of a plasmonic near-field. **Nature Communications**, v.6, 1-7, 2015.

PINTO, A.C., ZANETIC, J. É Possível Levar a Física Quântica para o Ensino Médio?

**Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.

PYLYSHYN, Zenon W. What the mind's eye tells to the mind's brain: a critique of mental imagery. **Psychological bulletin**, v. 80, n. 1, p. 1, 1973.

RAMOS, A. F.; ANDRADE NETO, A. S. Como são internalizadas as competências adquiridas quando um aluno utiliza computadores? Um exemplo de mediação cognitiva em rede durante a utilização de *software* de modelagem molecular. In: **IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**. Anais...p.1-10, 2013.

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. et al. Uso de um software de construção de modelos moleculares no ensino de isomeria geométrica: um estudo de caso baseado na teoria de mediação cognitiva. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 9, n. 1, p. 18-34, 2010.

ROCHA, J. F. M. **Origem e Evolução do Eletromagnetismo**. In: ROCHA, José Fernando Moura (org). *Origens e Evolução das Idéias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002.

ROCHA, J. ; ANDRADE NETO, A. S. .Um Estudo de Caso Exploratório sobre a Internalização de Conceitos sobre Eletrostática: A influência da Hipercultura e Mediação Digital. **RENOTE. Revista Novas Tecnologias na Educação**, v. 11, p. 11, 2013.

ROSA, C. A. de P..**História da Ciência: Da Antiguidade ao Renascimento Científico**. 2. ed. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, p.476, 2012.

ROSS, S. M.; MORRISON, G. R.; LOWTHER, D. L..Educational technology research past and present: Balancing rigor and relevance to impact school learning. **Contemporary Educational Technology**, v.1, n.1, p.17-35, 2010.

SALVETTI, A. **A história da Luz**. São Paulo: Livraria da Física. 2008.

SCHUCK, A. F.; SERRANO, A. Um exemplo do uso de experimentos virtuais objetivando a introdução de conceitos de mecânica quântica na disciplina de estrutura da matéria. In: **IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física**. Anais.. p.1- 10, 2004.

SERRANO, G.P. Investigación cualitativa. Retos e interrogantes. **I. Métodos**. Madrid, La Muralla S.A. p.230. 1998.

SILVA, B. V. da C. Young fez, realmente, o experimento da fenda dupla?. **Latin American Journal of Physics Education**, Mexico, v. 3, n. 2, p.1-8, 2009.

SILVA, C; MARTINS, C.; ANDRADE, R.. **O papel do experimento na óptica de Newton**. p. 199-226, 2006.

SOLBES, M. J.; SINARCAS, V. Utilizando La historia de La ciência em La enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. **Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales**, v.23, pp. 123-151, 2009.

SOLBES M. J.; SINARCAS, V. Una propuesta para La enseñanza-aprendizaje de la física cuántica basada em La investigación em didáctica de las ciencias. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 20, n. 1, p. 65-91, 2010.

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..Hiperultura 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.

STURMAN, A. Case study methods. In Keeves, J.P. (Ed). **Educational research, methodology, and measurement. An international handbook**. Oxford, Pergamon Press. p.61-66. 1988.

TAFT, R. Ethnographic research methods. In Keeves, J.P. (Ed). **Educational research, methodology, and measurement. An international handbook**. Oxford, Pergamon Press. p.71-75. 1988.

TIPLER, P. A; LLEWELLYN, R. A..**Física Moderna**. LTC editora, Rio de Janeiro, 3 Ed. 2006.

TREVISAN, R.; ANDRADE NETO, A. S. . 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.

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.

VERGNAUD, G. A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. **Revista do GEMPA**, Porto Alegre, nº 4, p. 9-19. 1996.

VYGOTSKY, L.S. **A Formação Social da Mente**. São Paulo: Martins Fontes Editora Ltda. 1984.

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.

WU, H.-K.; KRAJCIK, J.S.; SOLOWAY, E. Promoting Understanding of Chemical Representations: Students' Use of a Visualization Tool in the Classroom. **Journal of Research in Science Teaching**, v.38, n.7, p. 821-842, 2001.

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.

ZILIO, S. C. **Óptica Moderna: Fundamentos e Aplicações**. 2009. Disponível em: <<http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book1/Optica-Moderna.pdf>>. Acesso em: 14 mai. 2015.

**APÊNDICES**

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PRÉ-TESTE



ULBRA

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL

<p>DATA: ___/___/___</p> <hr/> <p>Nome legível do aluno</p>	<p>Este <b>Pré-Teste</b> é parte de uma pesquisa do programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática.</p>
---	---

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 esta disciplina (Física Moderna/Mecânica Quântica) antes, sem aprovação? (SIM) (NÃO)

1.1) Em caso positivo, você:

- (A) Não atingiu média suficiente para se aprovado
- (B) Não atingiu frequência mínima nas aulas para ser aprovado
- (C) Você desistiu da disciplina antes do término do semestre

1.2) Você já cursou alguma disciplina que tenha abordado conteúdos quânticos? Se sim, qual disciplina? E você ainda lembra de algum conteúdo/tópico?

---

---

1.3) Atualmente você está lecionando? Em caso positivo, escreva quais disciplinas e em quais séries.

---

---

2) Você sabe se existe alguma diferença entre um objeto microscópico e um macroscópico? Por exemplo, entre um elétron e um grão de areia. Explique.

---

---

3) Explique, como se você estivesse explicando para um colega, o que é interferência e difração. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

---

---

---

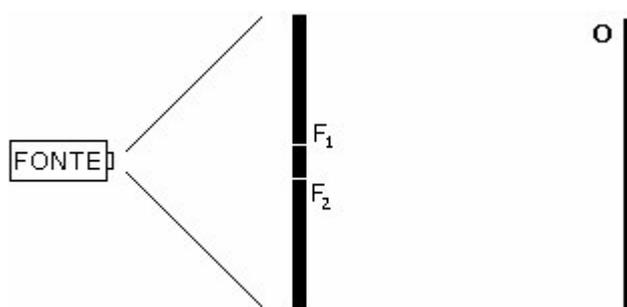
4) Explique, como se você estivesse explicando para um colega ou amigo, o que é um fóton. Para tanto, utilize o espaço abaixo na forma de texto, equações, figuras, etc.

---

---

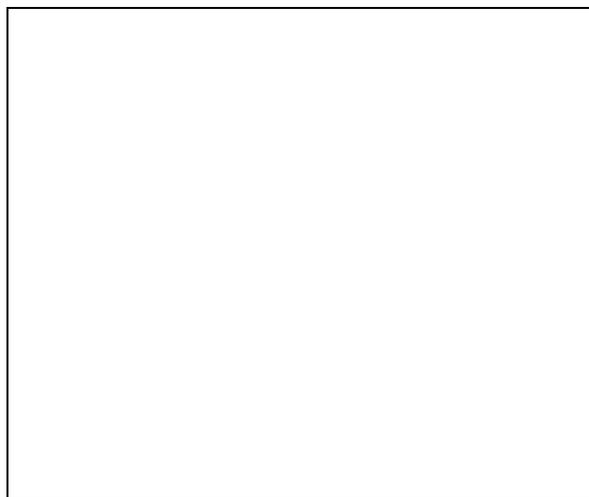
---

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



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

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



Anteparo O (Visão frontal)

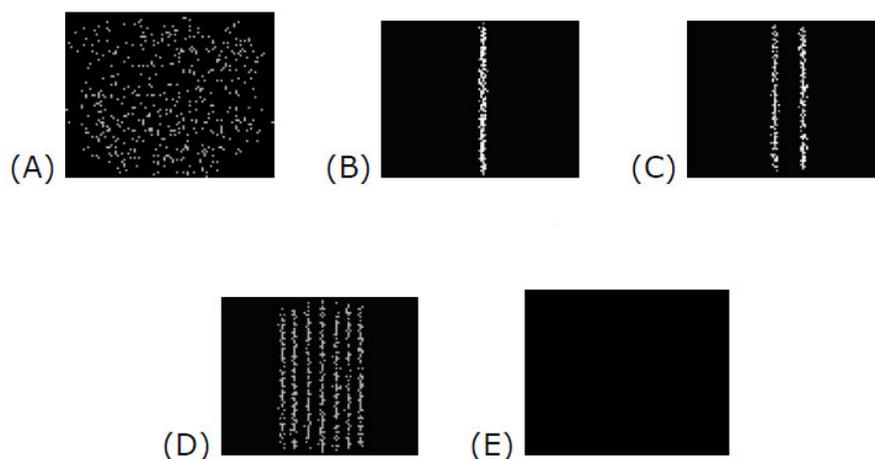
Por que você optou por desenhar esta imagem?

---

---

---

6)<sup>25</sup> 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?



Solicitamos por gentileza que forneça seu e-mail, para que possamos entrar em contato durante as etapas da pesquisa:

---

---

---

<sup>25</sup>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.

## APÊNDICE B – GUIA DE ATIVIDADE



UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL

<b>NOME:</b>	<b>PROFº:</b>
<b>CURSO:</b>	<b>DATA:</b>
<b>DISCIPLINA:</b>	

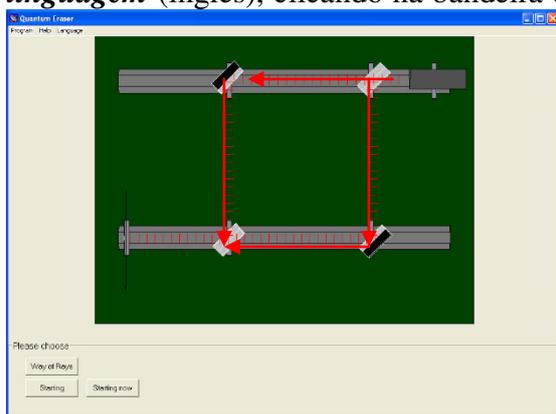
### GUIA PARA UTILIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

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 prever 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.

### 1º ATIVIDADE: SIMULADOR *QUANTUM ERASER*

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**.

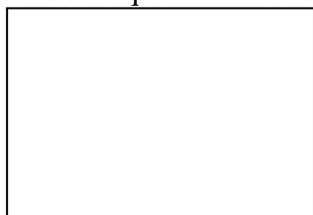
## 1 LASER

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:



(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:

---

---

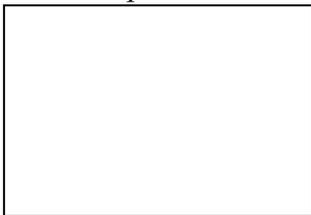
---

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:

---

---

---

---

---

Perguntas:

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 FÓTONS

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 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 percentagem:

---



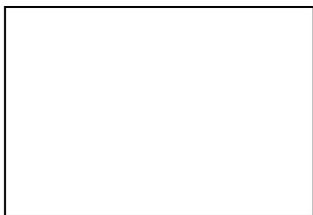
---



---

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*.

(PREVISAO) 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:

---



---



---

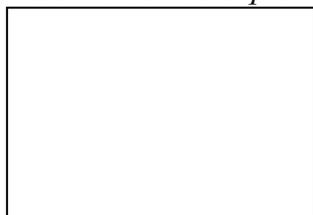
2.4 Apague a lâmpada. Agora, retire ambos os *detectores 1 e 2*.

(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.

---



---



---

Perguntas:

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?

---

---

---

---

## **2º ATIVIDADE: 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.

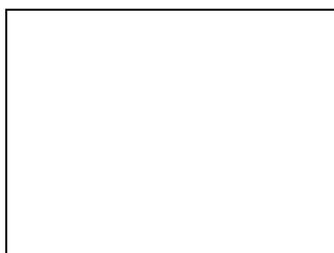
### **1 ARMA DE BALAS**

Feche o programa anterior, se ainda estiver rodando.

Para rodar este novo 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 *sourcee*, 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.

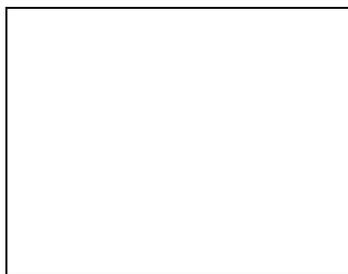
(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que acontece na tela, quando retirada a fenda direita (*slit 1*).



(OBSERVAÇÃO) Então, clique no botão  $\Theta$  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.

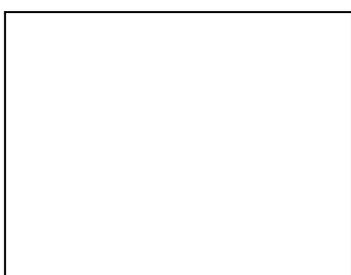
---



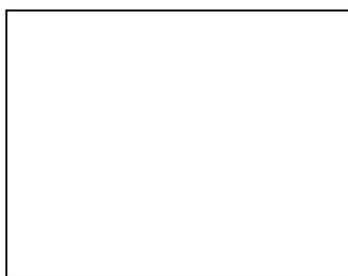
---

1.2 Agora, retire a fenda direita (*slit 1*) e acrescente a fenda esquerda (*slit2*), 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

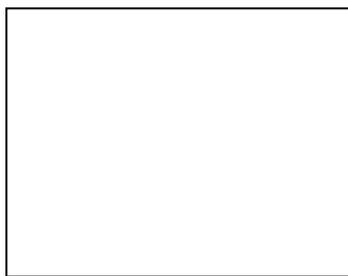


Padrão Formado

(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.

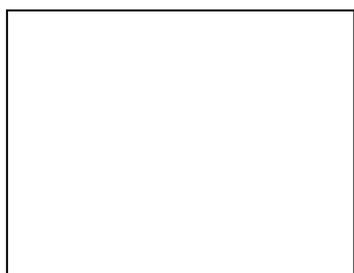


Gráfico



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.

---



---



---

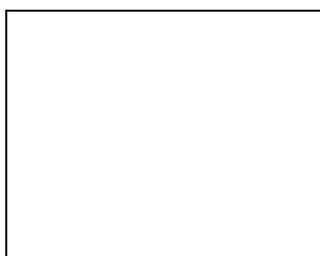
## 2 FÓTONS – LUZ

Agora, selecione a fonte, mais uma vez. Trabalhamos com balas (ou areia). Agora iremos repetir o experimento para luz, ou FÓTONS. Clique em *sourcee* selecione *photons*.

2.1 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  $\Theta$  que se encontra abaixo da fonte, para iniciar a saída dos fótons. Em seguida, abra a janela *screen* 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.

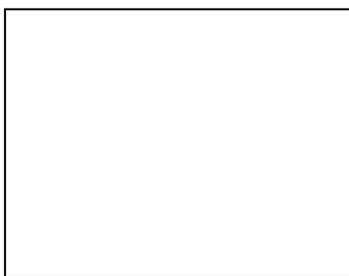
---



---

2.2 Agora, retire a fenda direita (*slit 1*) e acrescente a fenda esquerda (*slit2*), 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

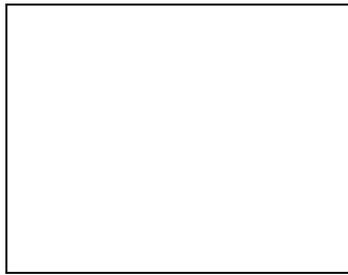


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Você já construiu o gráfico? Então, abra a janela *screen* 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

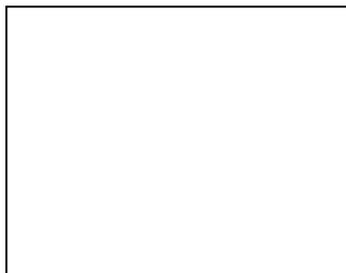


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Simule o resultado das duas fendas ativadas e registre os resultados. Não esqueça dos valores acumulados, apertando *evaluation*. 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.

---



---



---

### 3 ELÉTRONS

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 *sourcee* selecione *electrons*.

3.1 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  $\Theta$  que se encontra abaixo da fonte, para iniciar a saída dos elétrons. Em seguida, abra a janela *scree* 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)

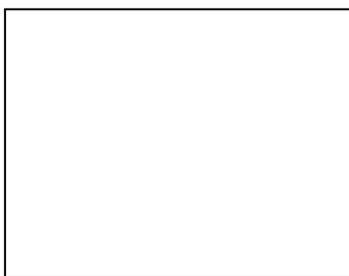


Gráfico (Evaluation)



Padrão formado

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

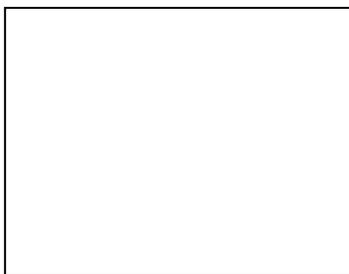
---



---

3.2 Agora, retire a fenda esquerda (*slit 1*) e acrescente a fenda direita (*slit2*), 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

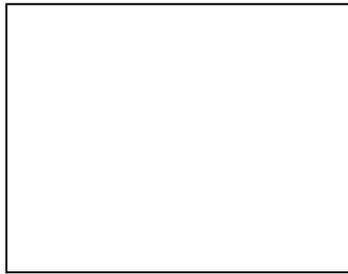


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Você já construiu o gráfico? Então, abra a janela *screen* clique em *evaluation* para comparar os resultados.



Gráfico



Padrão Formado

(EXPLICAÇÃO) Compare seus resultados e explique as diferenças, se houver.

---



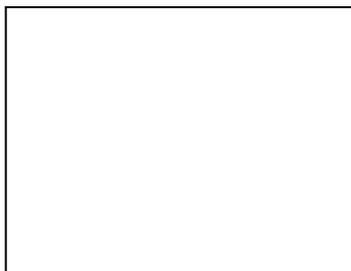
---



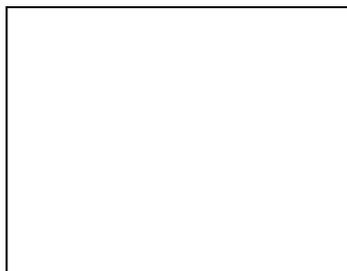
---

### 3.3 Ative agora as duas fendas.

(PREVISÃO) Desenhe abaixo o que você espera observar.



Gráfico

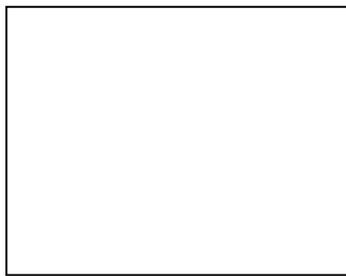


Padrão Formado

(OBSERVAÇÃO) Simule o resultado das duas fendas ativadas e registre os resultados. Não esqueça dos valores acumulados, apertando *evaluation*. (**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.

---



---



---

3.4 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.




---



---



---



---



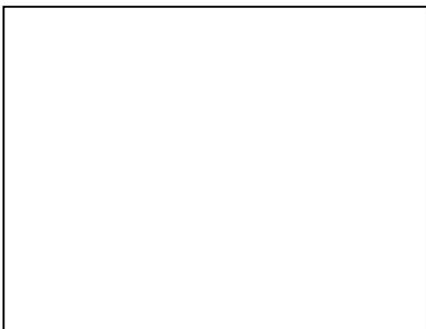
---



---

3.5 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.

---

---

---

---

3.6 Altere a intensidade da lâmpada para 100%. O que está acontecendo? Explique.

---

---

---

---

## APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO PÓS-TESTE



ULBRA

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL

Pós-Teste DATA: ____/____/____  _____ Nome Legível do Aluno	Este <b>Pós-Teste</b> é parte de uma pesquisa do programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática.
---	--

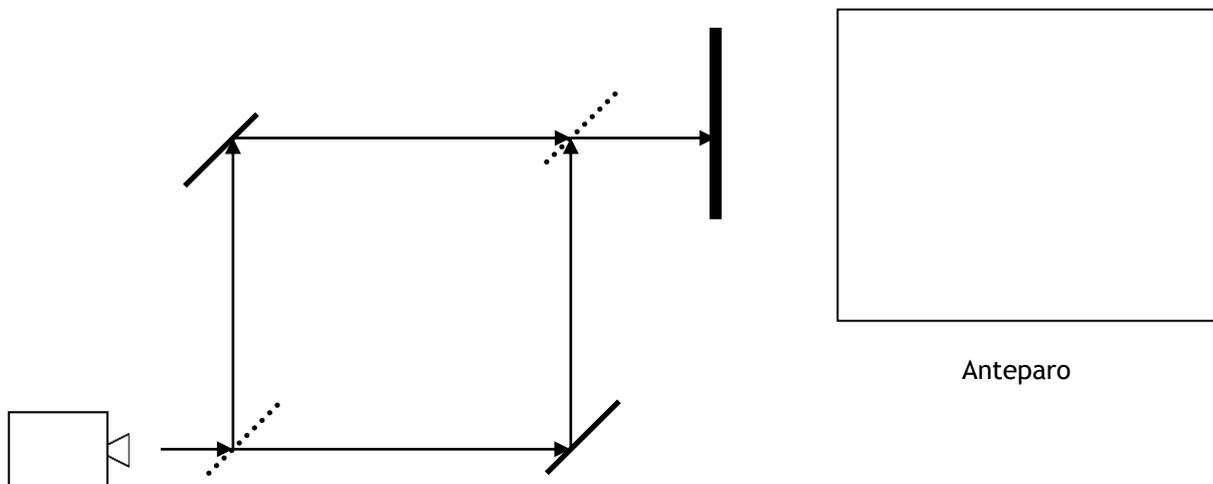
Caro Aluno,

Solicito sua colaboração, respondendo às questões formuladas a seguir. Este pré-teste tem por objetivo verificar se você possui conhecimentos prévios sobre alguns conteúdos da dualidade onda-partícula.

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) 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. Explique depois o desenho. Você poderia descrever o comportamento destes fótons até chegar ao anteparo? Justifique a sua resposta.




---



---



---

---

---

---

---

---

---

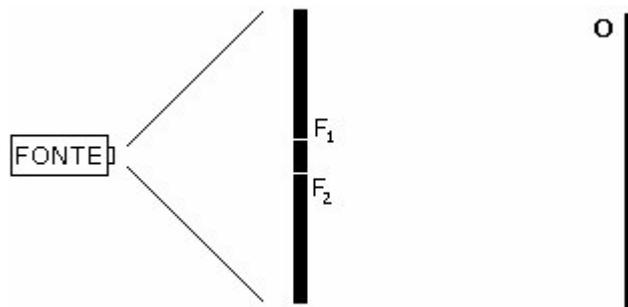
---

---

---

---

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



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

2) 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?

---



---



---



---

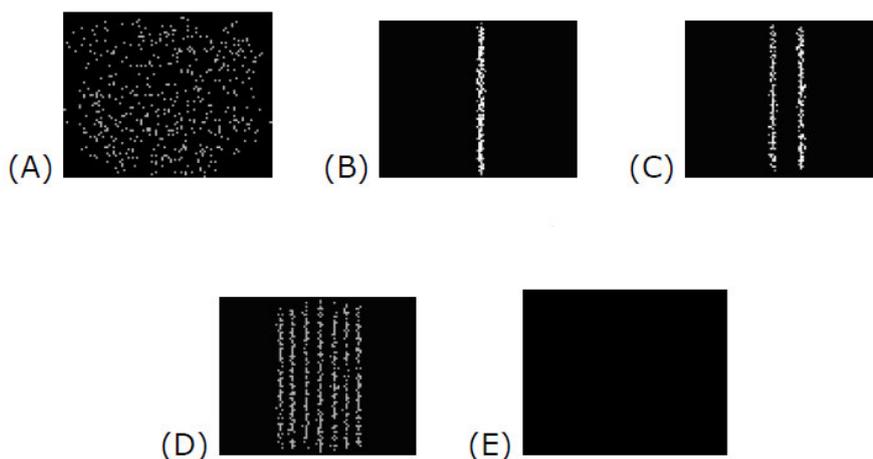


---



---

3) 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?



4) Observando o arranjo experimental representado anteriormente, mas considerando que a fonte esteja emitindo bolas de gude, e que as fendas tenham diâmetro da mesma ordem de grandeza dessas bolas. As bolas emitidas atingem o anteparo de observação após atravessarem as duas fendas, deixando marcas no anteparo.

Após algumas horas de funcionamento da fonte. Desenhe a imagem que melhor representa a situação.



