

Fenômenos intermediários de interferência e emaranhamento quânticos: o interferômetro virtual de Mach-Zehnder integrado a atividades didáticas⁺*

*Jader da Silva Netto*¹

Departamento de Ensino – IFRS

Bento Gonçalves – RS

*Fernanda Ostermann*²

*Cláudio José de Holanda Cavalcanti*³

Instituto de Física – UFRGS

Porto Alegre – RS

Resumo

Neste trabalho, apresentamos um conjunto de atividades didáticas que podem ser utilizadas para explorar conceitos de Física Quântica a partir da simulação computacional do Interferômetro de Mach-Zehnder. Tais atividades foram desenvolvidas à luz de pressupostos da teoria da medição de Vygotsky e da filosofia linguística de Bakhtin, durante uma pesquisa de doutorado. O conjunto de atividades faz parte de uma das etapas de reestruturação da simulação computacional, permitindo explorar, além da polarização da luz e os detectores demolição, os divisores de feixe com coeficientes variáveis e os detectores não-demolição. É possível simular, então, a interferência em regime clássico (fonte laser), em regime quântico (fótons únicos), os fenômenos intermediários de interferência quântica e o emaranhamento quântico. A compreensão desses fenômenos pelos estudantes não é trivial, uma vez que exige mudanças qualitativas profundas. A mediação realizada pelo software e atividades didáticas procura se constituir como um meio para que tais mudanças se estabeleçam. Essas atividades didáticas, cuja principal função é atuar

⁺ Interference intermediate phenomena and quantum entanglement: the virtual Mach-Zehnder interferometer integrated teaching activities

^{*} Recebido: julho de 2017.

Aceito: outubro de 2017.

¹ E-mail: jader.neto@bento.ifrs.edu.br; ² E-mail: fernanda.ostermann@ufrgs.br;

³ E-mail: claudio.cavalcanti@ufrgs.br

como ferramentas mediadoras no processo de ensino-aprendizagem, podem servir como ponto de partida para abordagens mais fenomenológicas da Física Quântica (sem, necessariamente, se restringir a elas) tanto nos cursos de licenciatura quanto de bacharelado em Física.

Palavras-chave: *Atividades didáticas; Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder; Ensino de Física Quântica.*

Abstract

In this paper, we present a set of teaching activities that can be used to explore concepts of Quantum Physics from the computer simulation of the Mach-Zehnder interferometer. These activities were developed according to Vygotsky's mediation theory and Bakhtin's linguistic philosophy in a PhD research. The set of activities is one of the steps that compose the restructuring of the computer simulation, allowing one to explore beyond the polarization of light and demolition detectors, the beam splitters with variable coefficients and the non-demolition detectors. This makes it possible to simulate interference in classical system (laser source), in quantum system (single photon), intermediate phenomena of quantum interference and quantum entanglement. Students' understanding of these phenomena is not trivial, requiring great qualitative changes. The mediation by software and didactic activities seeks to be a means for this to be established. These teaching activities, whose main function is to work as mediational tools in the teaching-learning process, behaves as a starting point for more phenomenological approaches to Quantum Physics (not necessarily be limited to) both in Pre-service Physics teachers' as Bachelor Physics courses.

Keywords: *Teaching activities; Virtual Mach-Zehnder Interferometer; Quantum Physics Teaching.*

I. Introdução

O ensino de Física Quântica (FQ) tem sido motivo de preocupação na área de pesquisa em ensino de Física. Vários trabalhos têm se dedicado a explorar essa temática, destacando-se o desenvolvimento de atividades experimentais (DEHLINGER; MITCHELL, 2002a; 2002b; DIMITROVA; WEIS, 2008; GALVEZ, 2010; GALVEZ *et al.*, 2005; HOLBROW *et al.*, 2002; SCHNEIDER; LA PUMA, 2002), o uso de metáforas (GOFF, 2006; JACOBS; WISEMAN, 2005), produção de tutoriais interativos (SINGH, 2001; 2008a; 2008b)

e uso de recursos computacionais (FERRARI; BRAUNECKER, 2010; GORDON; GORDON, 2010; KOHNLE *et al.*, 2012; KOHNLE *et al.*, 2010; MCKAGAN *et al.*, 2008; MÜLLER; WIESNER, 2002).

Nosso grupo tem contribuído com a pesquisa em ensino de FQ através de diversos estudos conduzidos a partir da simulação de fenômenos quânticos em um *software* desenvolvido pelo próprio grupo, o Interferômetro Virtual de Mach Zehnder (IVMZ). Nesses trabalhos, explorou-se a simulação computacional a partir do seu processo de desenvolvimento (OSTERMANN *et al.*, 2006), implementação em salas de aula (NETO *et al.*, 2011; OSTERMANN *et al.*, 2008; PEREIRA *et al.*, 2009b), interpretação física dos fenômenos envolvidos (OSTERMANN *et al.*, 2009; OSTERMANN; PRADO, 2005; PEREIRA; PESSOA JUNIOR, *et al.*, 2012) e análise de resultados de intervenções didáticas (PEREIRA, 2008; PEREIRA; OSTERMANN, 2012; PEREIRA *et al.*, 2009a; 2011; PEREIRA; OSTERMANN, *et al.*, 2012).

Mais recentemente, no período de 2012-2015, foram realizadas diversas modificações no *software*² a partir da implementação de novas funcionalidades. Além da mudança no *layout*, o usuário pode comparar os valores previstos teoricamente para a contagem de fótons em anteparos, ou detectores, com aqueles que são obtidos na simulação. A utilização de detectores não-demolição (não absorve o fóton e não altera o estado translacional do mesmo quando interage com ele) nos braços do interferômetro, por exemplo, ao permitir avaliar o comportamento dos fótons, abre caminho para a abordagem de temas atuais de FQ relacionados aos processos de medição. Outra inovação diz respeito à possibilidade de utilizar valores variáveis para os coeficientes de reflexão e transmissão nos divisores de feixe, permitindo explorar novos conceitos, como a complementaridade entre os comportamentos corpuscular e ondulatório dos objetos quânticos. A visualização de valores de visibilidade (contraste dos padrões nos anteparos) e distinguibilidade (informação sobre caminho associado aos fótons) permite quantificar propriedades complementares do fóton e que são essenciais para o estudo dos fenômenos de interferência quântica intermediária, uma classe de fenômenos que sequer é abordada em cursos introdutórios de FQ. Além dessas inovações, o *software* permite simular o emaranhamento quântico, a partir da criação de um par de fótons em um estado emaranhado de polarização.

Esta nova versão do *software* foi explorada em uma pesquisa de doutorado (NETTO, 2015), conduzida à luz da perspectiva sociocultural. Resultados dessa pesquisa já foram apresentados em outros trabalhos nossos (NETO *et al.*, 2014; NETTO *et al.*, 2014; 2015). Uma discussão tanto qualitativa quanto quantitativa da interferência em regime clássico nesta nova versão do IVMZ, realizada pelo nosso grupo de pesquisa, também está disponível na literatura (CAVALCANTI *et al.*, 2017). Um conjunto de atividades didáticas foi especialmente desenvolvido nessa pesquisa para explorar essas novas funcionalidades do *software* em nossos estudos.

² Uma versão preliminar pode ser obtida em: <<https://www.ensinofisicasociocultural.com/>>.

Neste artigo, buscamos apresentar essas atividades didáticas como forma de complementar as nossas discussões e também por reconhecer nosso compromisso com o processo de ensino-aprendizagem. A partir dos resultados de pesquisa obtidos e por considerar que nossos estudos possam despertar o interesse pela simulação computacional no IVMZ como forma de inovar o processo de ensino de FQ, discutindo conceitos mais atuais, esperamos que estas atividades sejam utilizadas por outros pesquisadores e professores.

II. Referencial teórico-metodológico

As atividades didáticas desenvolvidas foram estruturadas como parte de uma pesquisa cujos referenciais teórico-metodológicos são a teoria da mediação de Vygotsky e a filosofia da linguagem de Bakhtin. Embora o objetivo deste trabalho seja apresentar essas atividades, é fundamental realizar uma breve discussão em relação aos referenciais teóricos que orientaram nossa pesquisa. Isso se faz necessário para que o leitor possa ter uma visão mais completa sobre a investigação que realizamos e compreender o papel da simulação computacional e das atividades didáticas desenvolvidas.

A teoria psicológica de Vygotsky, considerada como precursora da perspectiva sociocultural, se preocupa, entre outras coisas, em compreender como o domínio de formas socioculturalmente situadas de ação mediada, isto é, no plano interpsicológico, pode levar a formas mais particulares das mesmas no plano intrapsicológico (WERTSCH, 1993).

A filosofia linguística de Bakhtin, por outro lado, possibilita compreender como a contextualização sociocultural da ação mediada está relacionada com o desenvolvimento mental do indivíduo. Essa perspectiva tem como um dos seus aspectos fundamentais o vínculo estabelecido entre a atividade humana e a utilização da linguagem, uma vez que considera que é na linguagem e pela linguagem que o ser humano se constitui. Fazemos a leitura do mundo e com ele interagimos num processo de busca pela socialização, onde a linguagem, enquanto produto da humanidade, é fundamental para garantir a plena construção de saberes que permitem o aperfeiçoamento do sujeito, imerso em um complexo sistema de signos. A linguagem não pode ser compreendida como sistema abstrato de formas e regras linguísticas, muito menos como enunciação monológica realizada isoladamente, mas como fenômeno social de interação verbal que é expresso através de enunciados (BAKHTIN, 2009).

Nessa pesquisa, realizada num curso de Licenciatura em Física, buscamos investigar, a partir da análise de interações discursivas, o processo de apropriação de conceitos fundamentais da FQ. Uma vez que as interações discursivas estabelecem possíveis “rotas dialógicas de aprendizado” dos conceitos físicos envolvidos, as análises foram conduzidas de forma processual, ao longo de toda a unidade didática. Para compreender os enunciados, buscamos, em

nossas análises, identificar vozes discursivas³, contrapalavras⁴ e gêneros discursivos⁵ utilizados pelos estudantes.

Considerando a perspectiva sociocultural, a partir da noção de atividade mediada, as atividades didáticas foram planejadas de modo a atuarem, juntamente com o *software*, como ferramentas mediadoras no processo de construção conceitual colaborativa entre os sujeitos pesquisados. O conceito de atividade mediada carrega consigo a noção de instrumentos e signos. Os instrumentos são de natureza material (medeiam a ação sobre os objetos) e os signos são de ordem psicológica e, a partir da perspectiva psicológica, podem ser denominados como ferramentas culturais (ou mediacionais), as quais são parte fundamental daquilo que se chama de ação mediada. Esta, por sua vez, pode ser vista como precursora do intercâmbio de signos, promovendo o crescimento intelectual e cultural dos indivíduos (VYGOTSKY, 1994). Nesta perspectiva, o conhecimento é visto não como o resultado de uma ação dos sujeitos sobre os objetos, mas de uma interação mediada por ferramentas culturais.

Tanto a simulação no IVMZ quanto as atividades didáticas são considerados ferramentas mediadoras pelo caráter problematizador que apresentam, numa espécie de convite à ação que é oferecido aos indivíduos e não podem ser vistos enquanto elementos isolados um do outro. O *software* é utilizado tanto como instrumento (no controle sobre as diversas situações possíveis na simulação computacional) quanto signo (uso de linguagem não verbal, símbolos e imagem animada tridimensional do interferômetro), interferindo no processo de apro-

³ A comunicação verbal se dá através de um processo dialógico no qual há a presença de pelo menos duas vozes: daquele que fala e aquele a quem se dirige a fala. Ao responder um enunciado são evocados os enunciados de outros e do próprio enunciador, de modo a reproduzi-los no processo de comunicação discursiva. Isto caracteriza o aparecimento de vozes discursivas em nossas palavras. Não há como se separar voz e enunciado, uma vez que “um enunciado oral ou escrito se expressa sempre desde um ponto de vista (uma voz)” (WERTSCH, 1993, p. 71). A esse respeito, o conceito de voz é descrito por Bakhtin como resultado da interação nas perspectivas sociais e individuais, de modo que as ‘nossas’ palavras são tomadas emprestadas de outros e carregadas de sentidos ideológicos. Na cadeia de enunciados de uma interação discursiva ou mesmo de um texto, mesmo não explicitamente, outras vozes podem moldar os discursos. Isto é, os discursos incorporam vozes que podem não ser aquelas que diretamente participam do processo enunciativo, mas vozes oriundas do contexto sociocultural no qual os agentes que participam diretamente do processo enunciativo estão inseridos. Sendo assim, essas vozes podem ter origem em diferentes espaços e épocas em que os discursos são construídos e têm papel importante nessa construção.

⁴ A compreensão de um enunciado por um indivíduo fica evidente quando este é capaz de reelaborá-lo com palavras e entonações próprias, ou seja, empregando seus próprios recursos linguísticos. Nos termos usados por Bakhtin, “a cada palavra da enunciação que estamos em processo de compreender, fazemos corresponder uma série de palavras nossas, formando uma réplica [...] quanto mais numerosas e substanciais forem, mais profunda e real é a nossa compreensão” (BAKHTIN, 2009, p. 137). Essa associação de contrapalavras (ou palavras alternativas que compõem o repertório do ouvinte) ao enunciado permite que cada indivíduo ressignifique o discurso produzindo novos sentidos e evidenciando uma carga sociocultural própria, determinada, por exemplo, por suas crenças ou ideologias. A variedade de contrapalavras associadas aos enunciados de outro é uma via importante para se investigar os significados que estão em jogo e as vozes discursivas intervenientes no processo de domínio ou apropriação das ferramentas culturais envolvidas.

⁵ Gêneros discursivos são formas relativamente estáveis de enunciados, que dão forma à utilização da linguagem e são caracterizados em função das situações típicas de comunicação verbal, de modo que todo enunciado carrega consigo um gênero discursivo (BAKHTIN, 1997). São exemplos de gêneros discursivos os textos jornalísticos, os artigos de divulgação científica, uma conversa informal entre amigos, a sentença em um tribunal, uma carta, entre outros.

priação dos conceitos. O processo colaborativo realizado a partir do *software* e das atividades didáticas desempenha um importante papel, atuando como via para o intercâmbio de ideias mediadas pela fala, o que torna possível o compartilhamento de significados.

Contemplando as duas perspectivas sobre mediação apresentadas por Wertsch (2007), podemos atribuir ao conjunto formado pelo *software* e atividades didáticas, o papel de ferramentas culturais tanto de mediação explícita quanto implícita. A mediação explícita se caracteriza pela materialidade dessas ferramentas culturais e por estas serem inseridas intencionalmente na ação. A mediação implícita, por sua vez, se manifesta pelo fato de que essas ferramentas exigem o uso intensivo de signos, que não se restringem apenas às funções comunicativas, como a linguagem, mas que assumem um importante papel na constituição mediada da consciência humana, significando os discursos dos indivíduos. Desta forma, tal como afirma Wertsch (2007), ao invés de representarem polos opostos, estas duas formas de mediação devem ser encaradas como sendo parte de um quadro conceitual amplo que, na perspectiva do trabalho que realizamos, permite reconhecê-las como sendo complementares entre si. No conjunto de atividades em questão, a relação dos estudantes com o mundo dos fenômenos físicos se dá por meio das ferramentas mediadoras utilizadas, de modo a desencadear um processo não de passividade, mas de participação ativa na organização do conhecimento.

As atividades didáticas que serão apresentadas nas próximas seções foram organizadas a partir da perspectiva da ação mediada. Foi nesse contexto de investigação, sobre apropriação discursiva de conceitos fundamentais da FQ, em que foram desenvolvidas tais atividades. Essas atividades foram testadas com duplas de estudantes em aulas de uma disciplina de Física Moderna e Contemporânea de um curso de Licenciatura em Física tanto como instrumento de pesquisa quanto como parte da estratégia didática. Outras discussões, em nível de referencial teórico e sobre apropriação discursiva, podem ser encontradas em trabalhos anteriores do grupo (NETO *et al.*, 2014; NETTO *et al.*, 2014; 2015).

III. Atividade Didática I: do estabelecimento de um plano inicial de intersubjetividade ao estudo do regime quântico

A atividade didática I está organizada de modo a possibilitar que a simulação computacional seja explorada com o interferômetro operando tanto em regime clássico quanto em regime quântico. A Fig. 1 ilustra o *layout* inicial do *software*.

Primeiramente, esta atividade busca auxiliar no estabelecimento de um plano inicial de intersubjetividade entre os estudantes e o professor. Isto é viabilizado por meio do reconhecimento dos dispositivos presentes e das primeiras discussões em relação ao papel que desempenham no interferômetro.

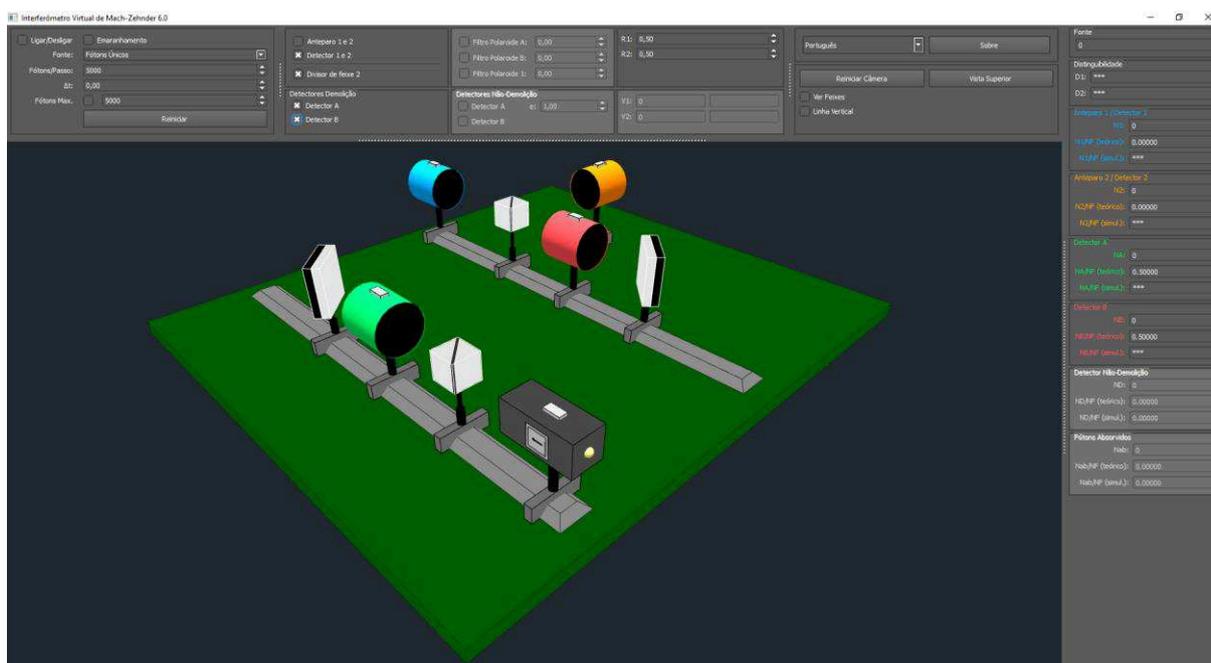
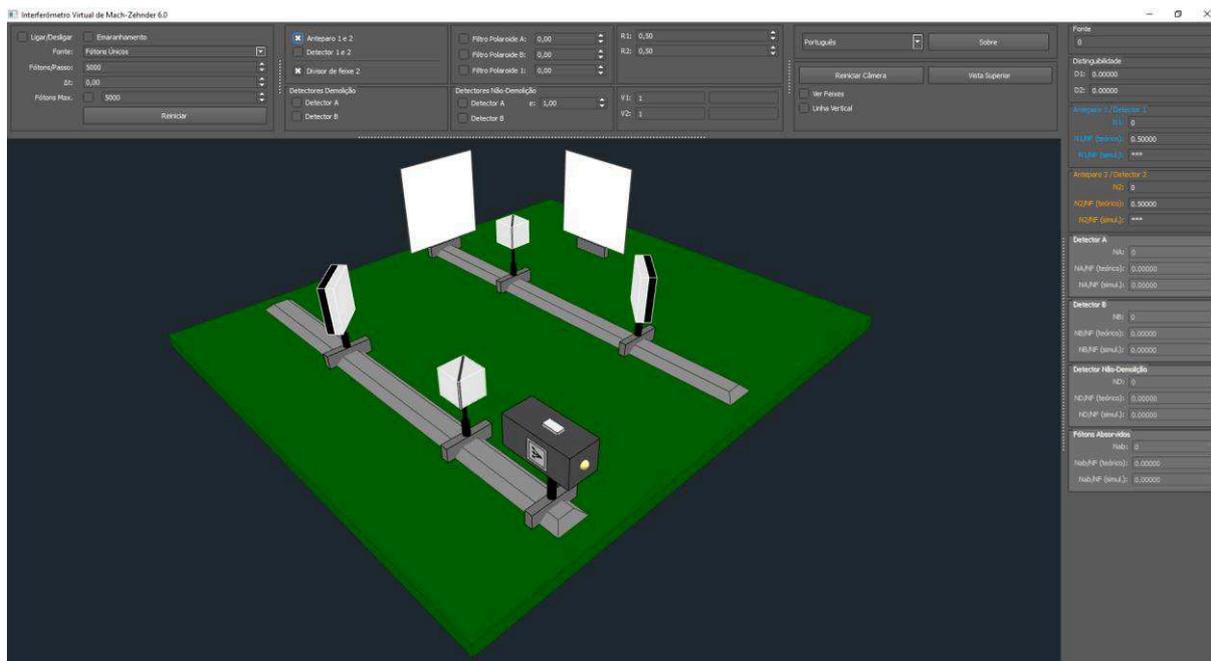


Fig. 1 – Captura de tela do IVMZ. Acima está mostrada a tela padrão (inicial) com os anteparos; abaixo com detectores no lugar dos anteparos, bem como nos braços do interferômetro.

No cenário característico de sala de aula, por exemplo, os diversos indivíduos envolvidos em determinada atividade podem exibir diferentes níveis de percepção e compreensão dos objetos e fenômenos que os rodeiam. O estabelecimento de um plano inicial de intersubjetividade, que é bastante importante (embora não simples), pode se dar em diversos níveis.

Pode ocorrer na forma de um acordo em que estudantes e instrutor compartilham minimamente significados-chave envolvidos na compreensão das diversas situações trabalhadas ou, em um extremo oposto, pode até constituir um processo mais completo em que ambos tenham representações bastante próximas para esses significados-chave. Na maioria dos casos, entretanto, a intersubjetividade ocorre em um termo intermediário onde a definição de situação intersubjetiva é negociada, algo que somente se torna possível a partir do que Wertsch (1984) chama de mediação semiótica, a qual pode ocorrer pelo uso da linguagem (seja por fala, textos, recursos simbólicos e/ou visuais). Uma exposição inicial realizada pelo professor (fala), por exemplo, ou, como no nosso caso, as orientações preliminares no roteiro ou material de aula (textos), buscam introduzir questões ligadas ao tema em estudo sem, entretanto, explicar ou discutir os fenômenos e conceitos envolvidos a ponto de responder todas as questões propostas nos roteiros. A familiarização com o *software* envolve ainda o domínio de recursos visuais (padrões de interferência, representação tridimensional do interferômetro na interface do *software* e seus dispositivos, entre outros). É por meio dessa mediação semiótica que uma espécie de plano de intersubjetividade, entre estudantes e instrutor, pode ser estabelecida.

Assim, foi proposto que em uma etapa inicial os estudantes tomassem contato com o *software*, para adquirir uma *proficiência simbólica* nas diversas configurações possíveis do interferômetro. A Fig. 1 mostra uma captura de duas possíveis configurações do interferômetro, citadas nas seguintes orientações preliminares do roteiro:

- 1- Com o *software* aberto, aumente o nível de *zoom* através do botão central [roda] do *mouse* a fim de facilitar a visualização das estruturas do interferômetro.
 - 2- A partir da tela inicial do *software*, identifique cada um dos dispositivos que constituem o IVMZ.
 - 3- No diagrama (Fig. 2), utilize os seguintes códigos para nomear os dispositivos: BS_1 e BS_2 (respectivamente, primeiro e segundo divisores de feixe), M_1 e M_2 (espelhos), D_A e D_B (detectores nos braços A e B, respectivamente), detectores 1 e 2 (detectores azul e laranja, respectivamente).
- Obs.: No lugar de detectores, podem ser colocados anteparos nas portas de saída do interferômetro, os quais serão identificados por anteparo 1 e anteparo 2.
- 4- Em relação aos seguintes dispositivos, qual o papel desempenhado por cada um no interferômetro:
 - a) divisores de feixe?
 - b) espelhos?

Este tipo de análise, que pode ser realizada com a fonte tanto desligada quanto em funcionamento (seja em regime clássico ou quântico), consiste em uma alternativa para que os estudantes possam se situar em relação ao que são e como atuam os espelhos e divisores de feixe, sem obrigatoriamente se preocuparem com questões relacionadas à natureza do fóton. Nos nossos estudos, percebemos situações em que a dificuldade dos estudantes em dado momento não estava ligada à natureza do fenômeno, mas à incompreensão sobre o papel dos

divisores de feixe. É comum que os estudantes apresentem essas dificuldades, principalmente quanto ao papel do segundo divisor de feixe (MARSHMAN; SINGH, 2016; 2017). Além disso, a nomenclatura utilizada para se referir a cada dispositivo começa a ser introduzida desde o início e a exigência para que os estudantes nomeiem os dispositivos, seguindo um padrão pré-estabelecido, visa uniformizar a linguagem, facilitando a comunicação em sala de aula (especialmente em discussões coletivas).

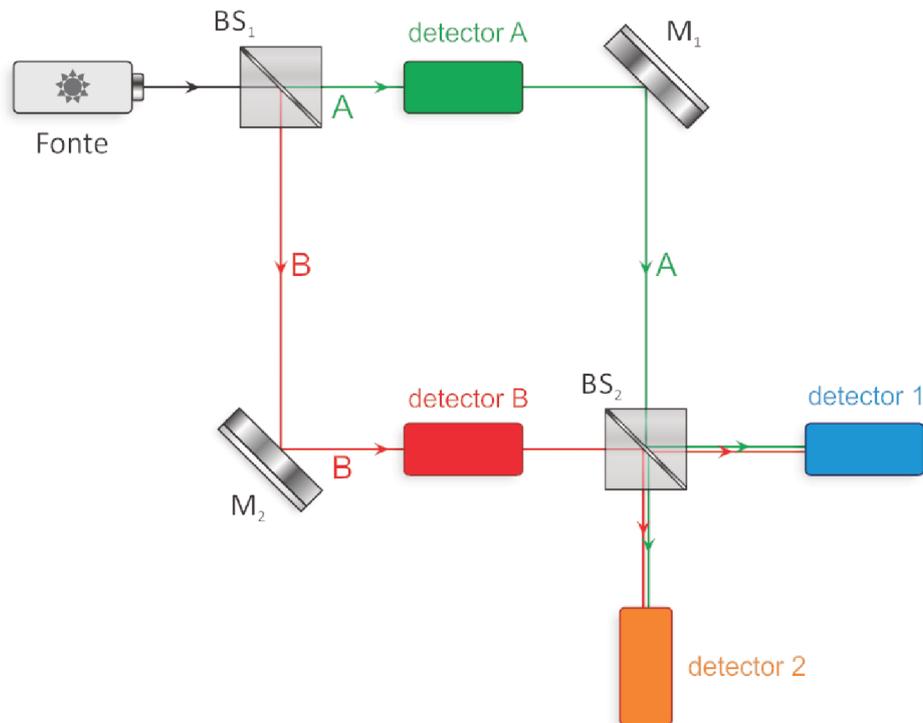


Fig. 2 – Diagrama representando o IMZ para que os estudantes possam identificar os dispositivos presentes.

A tarefa de nomear esses dispositivos e descrever as suas funções no interferômetro, além de exigir uma análise cuidadosa por parte dos estudantes, serve para que se iniciem as primeiras discussões em torno do segundo divisor de feixe (BS_2). Este dispositivo, independente da natureza ondulatória ou corpuscular atribuída à luz, é de fundamental importância, uma vez que não simplesmente divide o feixe, considerando-se somente a interpretação literal da palavra dividir. É no segundo divisor de feixe que se dá a superposição das componentes da luz associadas aos dois braços do interferômetro.

Pode ocorrer que nem todos os estudantes se deem conta, imediatamente, do importante papel desempenhado pelo segundo divisor de feixe. Por estarem se deparando com um contexto que difere daquele com o qual estão habituados, é bastante provável que aspectos como esse passem despercebidos num primeiro momento. Essa situação serve para exemplificar o caráter de ação mediada. A própria atividade didática, em função do caráter recursivo

com que foi planejada quando estruturaram-se as questões, permite retomar alguns pontos importantes, (re)orientando as ações durante a atividade e possibilitando a reformulação de hipóteses. Também vale destacar que as atividades didáticas são concebidas não com o objetivo de serem autossuficientes, mas de comporem um conjunto de ferramentas juntamente com o *software*, fazendo a mediação entre a simulação e o fenômeno físico envolvido, processo que se dá num contexto envolvendo os estudantes e o professor.

A sequência dessa atividade didática pode se dar a partir do estudo do regime clássico, centrado em aspectos da física ondulatória, em contextos em que o professor considere necessário partir de situações que sejam mais familiares aos estudantes. Outra possibilidade é partir de situações que não são tão familiares à maioria dos estudantes (pelo menos àqueles que não tiveram algum contato com a FQ). Vamos apresentar estes dois cenários possíveis mantendo, em ambos, a numeração sequencial relativa à parte inicial do roteiro, embora não haja correspondência direta entre as questões de mesmo número que são discutidas em cenários distintos.

III.1 Cenário clássico

Explorar a formação do padrão de interferência e a polarização da luz emitida por uma fonte *laser* pode ser, como já afirmamos, uma alternativa para que os alunos sejam introduzidos na atividade aos poucos, partindo de situações mais familiares.

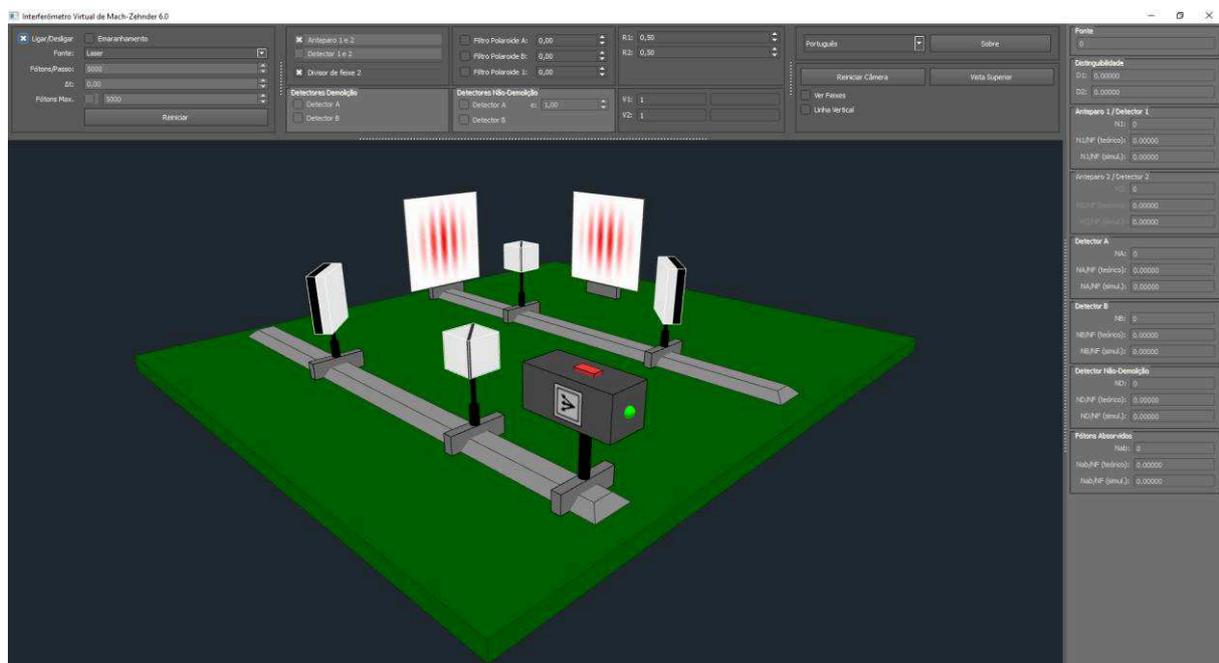


Fig. 3 – Padrão clássico de interferência se formando nos dois anteparos do interferômetro (fonte emitindo laser).

A formação de um padrão de interferência nos anteparos (Fig. 3) possibilita que os estudantes consigam relacionar imediatamente o fenômeno envolvido com algo que lhes é familiar, que é o padrão obtido no experimento da dupla fenda. A explicação da formação desses padrões, que ocorrem a partir da diferença de fase entre os componentes da luz que chegam aos anteparos, pode ser encontrada em outros trabalhos do grupo de pesquisa (NETTO, 2015; OSTERMANN *et al.*, 2009; OSTERMANN e PRADO, 2005; PEREIRA *et al.*, 2009b). Como não é algo trivial para o estudante e procurando oferecer algum ponto de apoio a partir do qual ele desenvolva sua explicação, a ocorrência das diferenças de fase nos espelhos e divisores de feixe aparece como forma de sugestão na atividade.

5- Na barra de ferramentas do lado direito, selecione a opção Ver Feixes e observe o comportamento do feixe laser no interferômetro. Depois, selecione novamente essa opção para desativar esse comando.

5.1- O que ocorre com a luz ao interagir com cada um desses dispositivos?

6- Na lista suspensa Fonte, selecione a opção laser e ligue a fonte.

6.1- O que representam as figuras que se formam nos anteparos?

6.2- Como podemos explicar a formação dessas figuras nos anteparos?

Dica: Cada reflexão nos espelhos introduz uma mudança de fase π na luz (que corresponde a uma diferença de caminho igual a $\lambda/2$ desta radiação). Nos divisores de feixe essa mudança de fase é $\pi/2$ (corresponde a uma diferença de caminho igual a $\lambda/4$).

7- Retire o segundo divisor de feixe do interferômetro (opção Divisor de Feixe 2) e observe os anteparos.

7.1- Qual o papel desempenhado por esse dispositivo?

Após estudar a formação dos padrões de interferência nos anteparos, o regime clássico no IVMZ possibilita explorar, e até retomar, o fenômeno da polarização da luz a partir de três situações: pode-se certificar que o feixe de luz laser emitido pela fonte está polarizado horizontalmente; é possível relacionar a redução da intensidade da luz no anteparo 1, a partir do uso de dois polaroides em sequência, com a lei de Malus; não há interferência entre as componentes da luz que têm direção de polarização perpendicular entre si, situação que pode ser obtida com polaroides cruzados (orientação relativa de 90 graus) nos braços do interferômetro, conforme mostra a Fig. 4.

8- Altere os coeficientes de reflexão do primeiro e segundo divisores de feixe para $R_1 = 0$ e $R_2 = 0$, respectivamente, e coloque um filtro polaroide no braço B do interferômetro (opção Filtro Polaróide B).

8.1- Qual a função de um filtro polaroide?

8.2- O que podemos afirmar sobre a polarização da luz emitida pela fonte?

9- Sem alterar as configurações do IVMZ, responda: o que você espera em relação ao padrão de detecções no anteparo 1 se o filtro polaroide estiver orientado a 90 graus?

10- Coloque o polaroide orientado a 90 graus e verifique o que acontece.

11- Mantendo os valores $R_1 = 1$ e $R_2 = 0$ e sem realizar a simulação, o que você espera que aconteça com o padrão de detecções no anteparo 1 quando o polaroide estiver orientado a 30 graus?

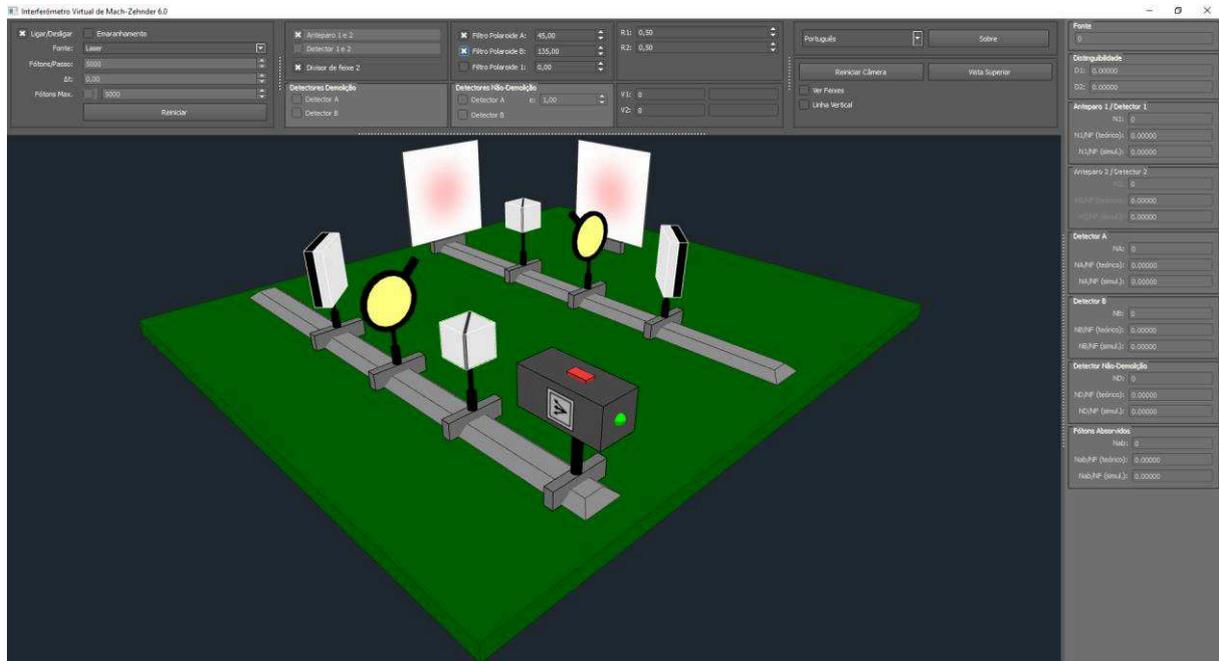


Fig. 4 – Interferômetro com polaroides cruzados, destruindo os padrões de interferência nos anteparos.

12- Execute a simulação com os parâmetros do item anterior.

13- Mantendo o filtro polaroide do braço B orientado a 30 graus, insira um filtro polaroide em frente ao anteparo 1, orientado a zero graus (opção Filtro Polaroides 1) e, sem executar a simulação, descreva sua previsão quanto ao que espera que aconteça com o padrão obtido nesse anteparo.

14- Execute a simulação. Como podemos interpretar as alterações nos padrões de detecção no anteparo 1 a partir da lei de Malus ($I = I_0 \cos^2 \xi$, sendo ξ o ângulo entre a direção do eixo de transmissão do polaroide e a direção horizontal)?

15- Retire os polaroides (ou oriente ambos na direção horizontal), recoloque o segundo divisor de feixe no interferômetro e faça $R_1 = R_2 = 0,50$. Você deve obter novamente os padrões de interferência em ambos os anteparos.

16- Altere a orientação dos polaroides de modo que um deles fique orientado a 45 graus e o outro a 135 graus.

16.1- Como podemos explicar as alterações nos padrões de detecção formados sobre os anteparos?

É importante destacar que o estudo do fenômeno da polarização neste roteiro já abre espaço para as primeiras discussões em relação à natureza da luz, embora a ocorrência das mesmas nessa fase da atividade seja uma possibilidade e não uma regra. O cenário clássico

desse roteiro exploratório não exige que seja introduzido nenhum conceito novo, para além da Física Clássica, para explicar os fenômenos observados. Sua importância pode ser justificada pelo fato de possibilitar que os estudantes comecem, aos poucos, a se apropriarem do *software*. Por outro lado, é preciso ser cauteloso nesta abordagem, valendo-se das analogias com a Óptica Ondulatória Clássica, mas, ao mesmo tempo, tomando cuidado para não reforçar uma visão clássica do fenômeno que não poderá ser empregada em contextos em que se estuda fenômenos com fótons únicos.

III.2 Cenário quântico

A discussão dos padrões de interferência no cenário quântico tem como um dos objetivos um entendimento qualitativo sobre os possíveis estados translacionais do fóton no interferômetro. No regime quântico, considera-se que a fonte emite um fóton por vez, o qual incide no interferômetro. Esses fótons interagem um a um com os dispositivos presentes no interferômetro e atingem os anteparos ou detectores nas portas de saída. Gradativamente, um padrão de interferência vai sendo construído ponto a ponto nesses anteparos (supondo que esses anteparos produzam uma marca pontual para cada fóton que nele incidir). Os vetores de estado $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$, mostrados na Fig. 5, são os chamados estados translacionais do fóton, em estrita analogia com as duas direções de propagação possíveis dentro do interferômetro⁶. Como proposto por Dirac (1958, p. 7), cada fóton “está localizado em algum lugar na região do espaço através da qual o feixe está se propagando e possui seu *momentum* [linear] na direção desse feixe”. Convém esclarecer que, com o uso da palavra “localizado”, Dirac não quer dizer de forma alguma que o fóton possui uma posição definida, tal qual uma partícula clássica. Ele, ao contrário, afirma que o fóton é deslocalizado espacialmente⁷, mas pode ser detectado ao longo de um feixe propagando-se com uma direção mais ou menos definida. Assim, os estados translacionais $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$ são relacionados a estados de *momentum* do fóton – pode-se pensar cada um deles como descritos por uma superposição contínua de estados de *momentum*, representada matematicamente como uma distribuição angular estreita desses estados de *momentum* em torno das direções x e y , respectivamente. Com isso, não se pode dizer que o fóton percorre uma trajetória retilínea nessas direções como uma partícula clássica. É fisicamente inconsistente descrever um feixe de fótons como sendo perfeitamente colimado em uma dada direção após passar por uma fenda de dimensões finitas na saída da fonte.

Segundo essa notação de estados translacionais, se a fonte monofotônica estiver posicionada na porta de entrada I, como mostrado na Fig. 5, o estado translacional do fóton antes de interagir com o primeiro divisor de feixe será dado por $|\Psi_{in}\rangle = |s_x\rangle$.

⁶ Não foi usada a notação $|x\rangle$ e $|y\rangle$ para os estados translacionais, comumente utilizada na literatura, para não criar confusões com autoestados de posição. Note que esses estados translacionais são ortogonais e definem uma base no espaço de Hilbert de estados translacionais possíveis no interferômetro (a descrição quântica dos estados translacionais do fóton enquanto se propaga no interferômetro pode ser feita em termos desses dois estados).

⁷ Localizado em *algum* lugar na região do espaço em que se propaga o feixe – ou seja, não possui localização definida ao longo do feixe, mas possui *momentum* relativamente bem definido.

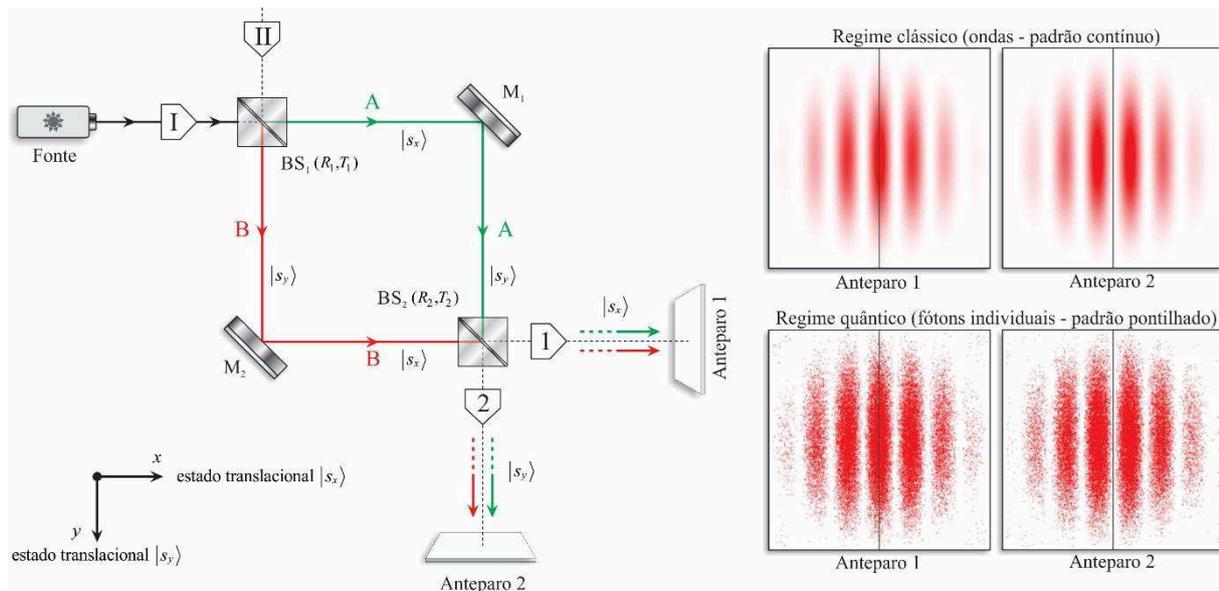


Fig. 5 – Representação esquemática do IMZ (esquerda) e os padrões de interferência formados nos anteparos quando ambos os divisores de feixe são balanceados (coeficientes de reflexão R_1 e R_2 – e, portanto, também os de transmissão $T_1 = 1 - R_1$ e $T_2 = 1 - R_2$ – iguais a $1/2$). São mostrados esses padrões nos regimes clássico e quântico. Há duas possíveis portas de entrada (I e II) e de saída (1 e 2). Nas portas de saída pode-se posicionar dois anteparos (ou detectores de fótons). Uma linha vertical é mostrada nos padrões de interferência, para ajudar a visualizar que os padrões nos anteparos 1 e 2 são invertidos entre si. Os vetores de estado que representam os possíveis estados translacionais do fóton no interferômetro também são mostrados.

O divisor de feixe é descrito matematicamente por um operador que transforma esse estado translacional inicial em uma superposição linear dos dois estados translacionais possíveis, dada por $|\Psi_{BS_1}\rangle = i\sqrt{R_1}|s_y\rangle + \sqrt{T_1}|s_x\rangle$. Assim, o fóton não possui mais um estado translacional definido, mas um estado translacional que possui ambas as características translacionais $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$, como afirmam Brom e Rioux (2002, p. 203). Assim, caso seja inserido um detector de fótons em um dos braços do interferômetro (por exemplo, no braço A), apenas uma dessas duas características translacionais será revelada a cada medição. Nesse caso, o detector terá uma probabilidade um estado translacional que possui ambas as características translacionais $|s_x\rangle$ e $|s_y\rangle$, como afirmam Brom e Rioux (2002, p. 203). Assim, caso seja inserido um detector de fótons em um dos braços do interferômetro (por exemplo, no braço A), apenas uma dessas duas características translacionais será revelada a cada medição. Nesse caso, o detector terá uma probabilidade T_1 de acusar o fóton (com o estado do fóton colapsando para $|s_x\rangle$), logo após o primeiro divisor de feixe – correspondendo ao braço A). Obviamente, nessa configuração haverá uma probabilidade R_1 desse detector não acusar o fóton, correspondendo à reflexão, levando o estado translacional do fóton a colapsar para $|s_y\rangle$ (correspon-

dendo ao braço B do interferômetro). Não é correto pensar como se o fóton pudesse ser “dividido” pelo primeiro divisor de feixe nesse processo, sendo parcialmente refletido (mudando seu estado translacional inicial para $|s_y\rangle$) e parcialmente transmitido (mantendo esse estado translacional inicial inalterado). Há evidências experimentais apoiando a indivisibilidade dos fótons (GALVEZ *et al.*, 2005; GRANGIER *et al.*, 1986; THORN *et al.*, 2004). Fótons são, de fato, *quanta* indivisíveis de energia. Analisando, com essas premissas em mente, o caso em que a fonte emite fótons únicos explora-se, inicialmente, a indivisibilidade dos fótons, a partir da constatação da impossibilidade de detecção simultânea dos mesmos.

5- A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos possibilitaram a utilização de fontes luminosas que operam em regime quântico (como nos experimentos de Alain Aspect e seus colaboradores). No regime quântico, ou regime monofotônico, a intensidade luminosa é tão baixa que apenas um fóton é emitido por vez pela fonte.

5.1- Considerando que a fonte emita apenas um fóton de cada vez, como você espera que se distribuam as contagens de fótons nos braços A e B do interferômetro? Responda essa pergunta sem executar a simulação.

6- Certifique-se de que a fonte está na opção *Fótons Únicos*. Insira um detector em cada braço do interferômetro (Opção *Detectores Demolição*).

6.1- Configure a fonte para disparar um fóton por ciclo (*Fótons/Passo*). Atribua o valor 1 para Δt (assim, há um intervalo de 1 segundo entre fótons consecutivos). Há detecções simultâneas nos detectores? Como isso pode ser interpretado?

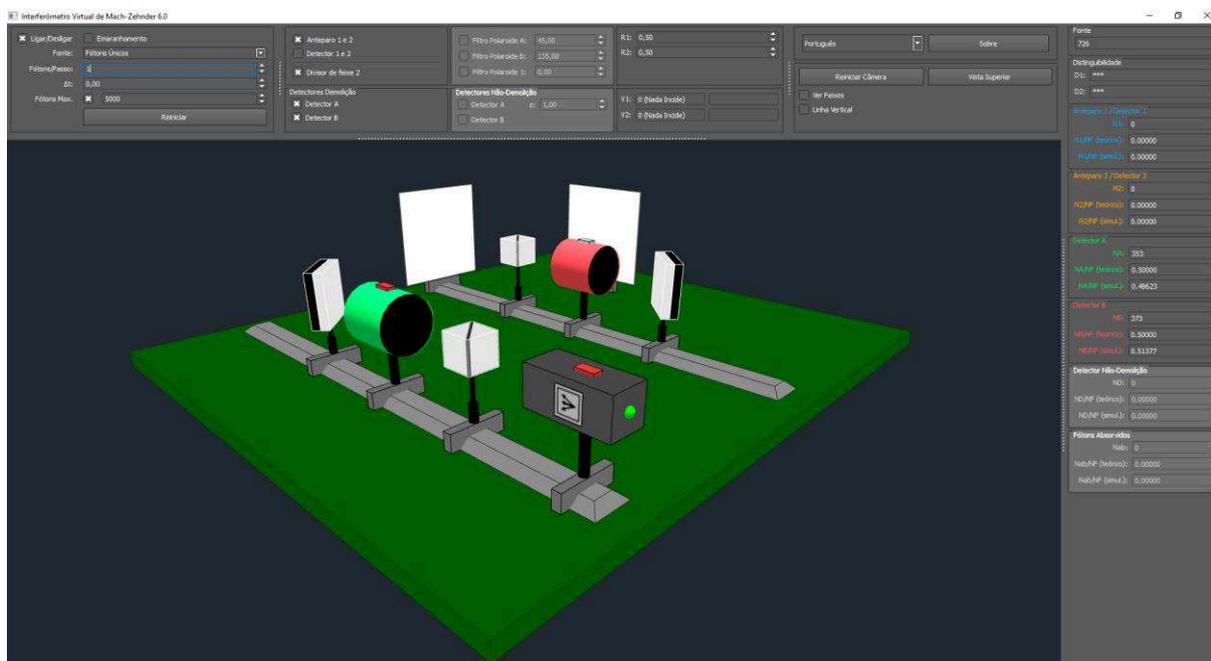


Fig. 6 – Detectores demolição em ambos os braços do interferômetro (consideramos aqui detectores demolição aqueles que absorvem o fóton que interage com ele). A luz vermelha no detector 1 (verde) indica a detecção de um fóton por este dispositivo.

A indivisibilidade do fóton pode ser verificada a partir da utilização de detectores em ambos os braços do interferômetro, conforme representado na Fig. 6. Para evitar situações duvidosas que possam levar a falsas detecções simultâneas foi aconselhado utilizar uma baixa taxa de emissão de fótons, o que pode ser feito alterando-se os valores utilizados nas opções *Fótons/Passo* e Δt (considerando a existência de um intervalo de tempo entre as emissões individuais).

Além de problematizar a impossibilidade de divisão do fóton, outra etapa importante da simulação consiste em levar os estudantes a perceberem que os eventos envolvendo os divisores de feixe são probabilísticos. Uma vez que o fóton não pode ser dividido nesses dispositivos, a própria linguagem utilizada já precisa ser transformada, exigindo que se fale em probabilidades de reflexão e de transmissão.

6.2- Selecione o valor 0 para Δt e reinicie o processo disparando fótons no regime de 100 por ciclo. Após a contagem de fótons emitidos pela fonte chegar em 5000 (*Fótons Max.* igual a 5000), descreva o que você observou na distribuição das contagens de fótons nos detectores.

6.3- Rode três vezes a simulação usando os mesmos parâmetros do item 6.2. Explique por que não se obtém a mesma contagem nas três vezes, já que os parâmetros iniciais são os mesmos.

6.4- Considerando o item anterior, como você descreve a função do dispositivo BS_1 (primeiro divisor de feixe)?

7- Utilize agora diferentes valores para o coeficiente R_1 e repita o item 6.3. Os valores mínimo e máximo admitidos para este dispositivo são, respectivamente, zero e 1.

7.1- A partir dos valores utilizados para R_1 , como podemos interpretar a função do dispositivo BS_1 ? Qual o significado físico da quantidade R_1 ? Qual a principal consequência na simulação ao variar o valor de R_1 ?

8- Em relação ao segundo divisor de feixe (dispositivo BS_2), qual você considera que seja o papel que ele desempenha no interferômetro?

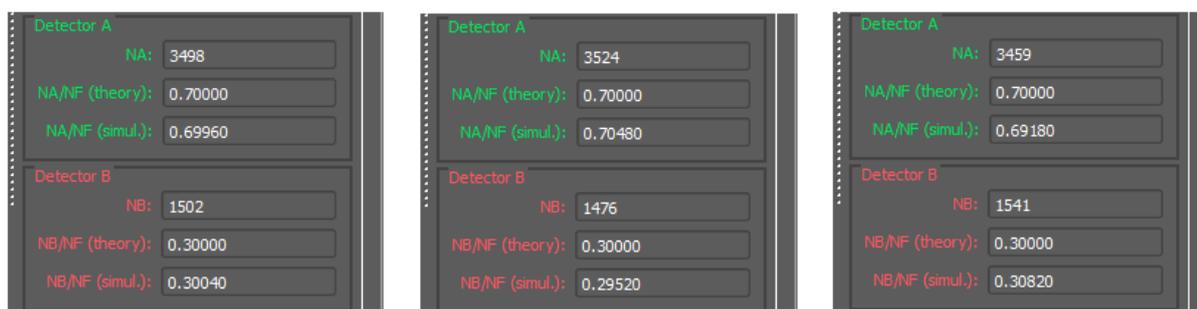


Fig. 7 – Contagens obtidas nos detectores posicionados nos braços do interferômetro realizando-se a simulação três vezes com o coeficiente $R_1 = 0,30$, ilustrando o caráter probabilístico dos eventos de reflexão e transmissão nos divisores de feixe. Os valores previstos teoricamente também são mostrados, para comparação.

A natureza probabilística da interação do fóton com cada divisor de feixes é evidenciada quando são observadas as diferentes contagens mostradas pelo *software*. Outra forma de problematizar a discussão em torno da noção de probabilidade é através da alteração dos coeficientes de reflexão e transmissão dos divisores de feixe.

Na Fig. 7 pode-se visualizar diferentes valores obtidos para as contagens nos detectores repetindo-se a simulação para o mesmo valor do coeficiente de reflexão do primeiro divisor de feixe, para 5000 fótons emitidos pela fonte.

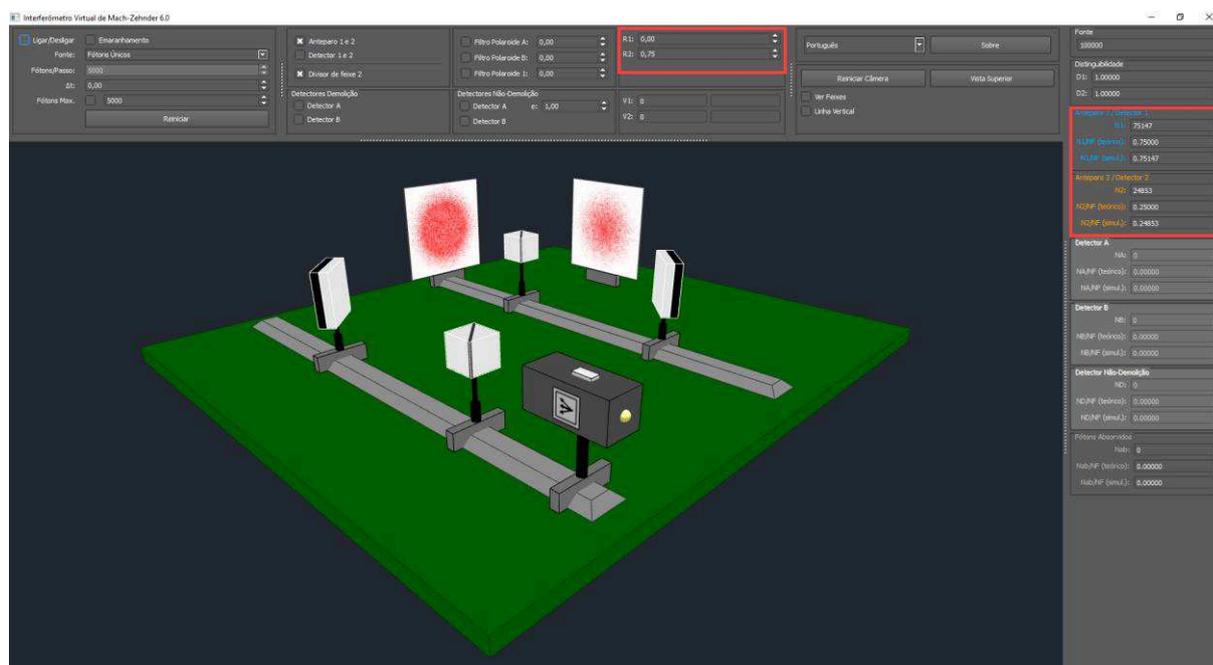


Fig. 8 – Contagens de fótons obtidas para $R_1 = 0$ e $R_2 = 0,75$. Os fótons, associados ao braço B do interferômetro são refletidos ou transmitidos com determinadas probabilidades no segundo divisor de feixe.

Isso também criará um cenário favorável para que a discussão em torno do papel exercido pelo segundo divisor de feixe seja retomada. É um momento importante para que a linguagem dos estudantes comece a introduzir e a relacionar termos novos. Dividir o feixe, sem que isso signifique dividir o fóton, requer o reconhecimento de que a reflexão/transmissão do mesmo nos divisores de feixe agora se dá de forma probabilística. O segundo divisor de feixe terá, então, a função de superpor estes efeitos. Na Fig. 8 é possível visualizar as contagens de fótons a partir da variação do coeficiente de reflexão do segundo divisor de feixe.

9- Faça as seguintes alterações no interferômetro: selecione $R_1 = 0$ e retire os detectores inseridos anteriormente.

9.1- Mantendo $R_2 = 0,50$ e selecionando o valor 1 para *Fótons/Passo* e também para Δt , verifique se as contagens em cada anteparo incrementam simultaneamente ou alternadamente. Explique suas observações.

9.2- Atribua o valor 0 para Δt e 100 para *Fótons/Passo*, observando as contagens nos anteparos. Após 5000 fótons disparados, responda: que função básica tem o dispositivo BS₂?

10- Altere o valor de R_2 e observe novamente as contagens. Os valores mínimo e máximo de R_2 são, respectivamente, zero e 1.

10.1- De que forma a alteração nos valores de R_2 influencia as contagens nos anteparos?

Para permitir que os estudantes consigam retomar e, se for necessário, reelaborar suas explicações, o roteiro procura apresentar o mesmo problema a partir de diferentes questionamentos. Procuramos introduzir um grau crescente de dificuldade na atividade para que a mesma não se tornasse repetitiva.

11- Mantendo $R_1 = 0$, coloque um detector no braço B do interferômetro e observe as contagens no mesmo.

11.1- A presença desse detector tem alguma relação com a distribuição das contagens nos anteparos?

11.2- Explique como a presença desse detector se relaciona com a distribuição das contagens nos anteparos se $R_1 \neq 0$.

11.3- Como se dá a conservação do número de fótons desde a emissão pela fonte até a detecção nos anteparos e no detector no braço B?

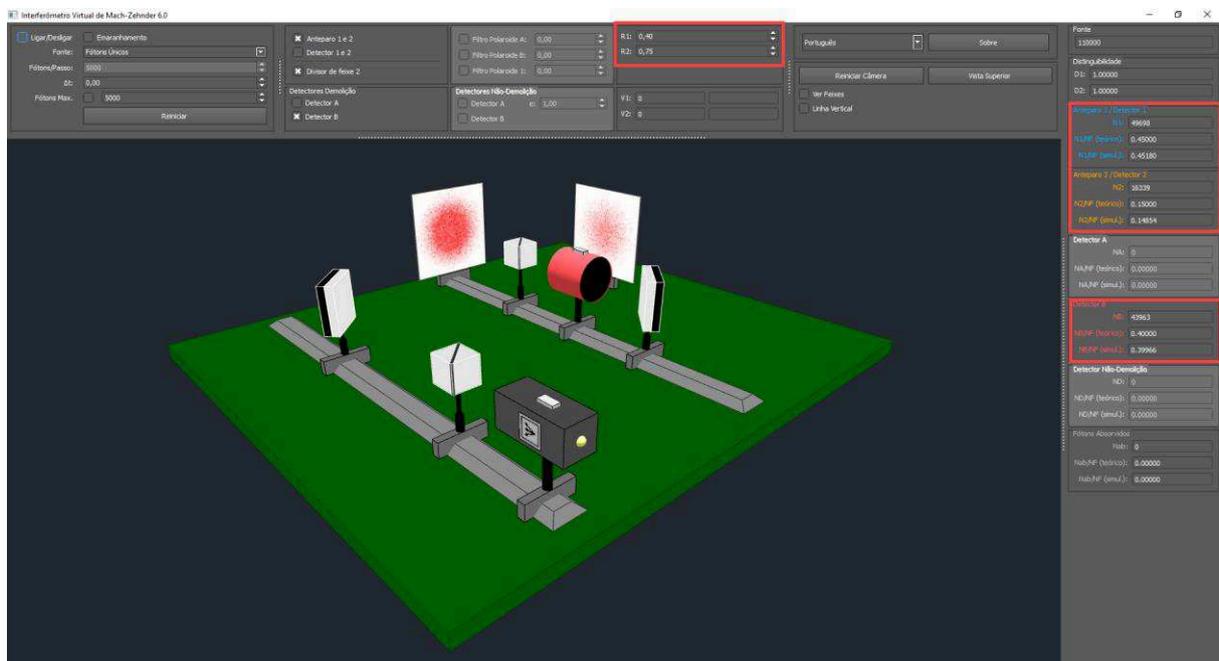


Fig. 9 – Absorção de fótons no braço B (pelo detector) do interferômetro quando $R_1 = 0,40$ e $R_2 = 0,75$, enfatizando o caráter probabilístico da reflexão e transmissão nos divisores de feixe.

Quando um detector demolição é inserido no braço B do interferômetro e $R_1 = 0$ o contexto é praticamente o mesmo da Fig. 8, de modo que as contagens nos anteparos são alteradas em função do caráter probabilístico dos eventos de reflexão e transmissão no segundo divisor de feixe e não pela presença do detector (os fótons são todos transmitidos no primeiro divisor de feixe, ou seja, nenhum interage com o detector). Variando-se o valor do coeficiente R_1 pode-se observar que o percentual de fótons absorvidos no detector presente no braço B coincide com a probabilidade de reflexão do primeiro divisor de feixe, conforme pode-se observar na Fig. 9. A ação do segundo divisor de feixe se dá, portanto, apenas sobre os fótons associados ao braço A do interferômetro, segundo as probabilidades de reflexão e transmissão daquele dispositivo. Como os detectores, divisores de feixe, espelhos e anteparos são considerados ideais, a probabilidade total é conservada⁸.

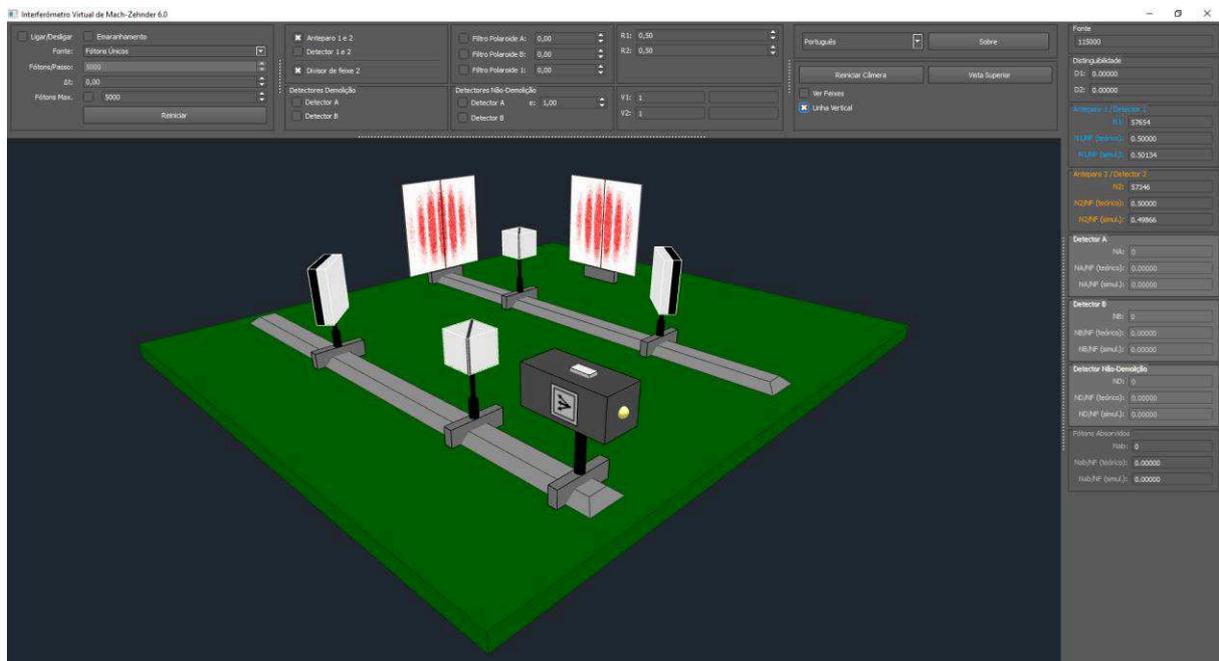


Fig. 10 – Padrões de interferência obtidos no regime quântico com $R_1 = R_2 = 0,50$.

A obtenção dos padrões de interferência nos anteparos após os estudantes terem se certificado de que não há detecções simultâneas em ambos os braços do interferômetro e que os eventos de reflexão e transmissão nos divisores de feixe são probabilísticos busca explorar novamente o papel exercido pelo segundo divisor de feixe e a noção de que o fóton se encontra em uma superposição de estados após o primeiro divisor de feixe. A Fig. 10 representa os padrões obtidos nos anteparos quando os divisores de feixe estão balanceados. Ao retirar o

⁸ Na situação mostrada na Fig. 9, a soma das probabilidades de incidência nos anteparos 1 e 2, respectivamente dadas por p_1 e p_2 , é menor do que 1, pois há uma probabilidade $p_A = R_1 = 0,40$ do fóton interagir com o detector no braço B e ser absorvido. As probabilidades de incidência de fótons em cada anteparo são dadas por $p_1 = T_1 T_2 = (1 - R_1)(1 - R_2) = 0,15$ e $p_2 = R_1 R_2 = 0,45$, resultando em $p_1 + p_2 = 0,60 < 1$. Por outro lado, a probabilidade total é dada por $p_T = p_1 + p_2 + p_A = 0,60 + 0,40 = 1$, ou seja, é conservada.

segundo divisor de feixe do interferômetro, pode-se discutir o papel que este dispositivo desempenha no interferômetro para além das probabilidades de reflexão e transmissão, já que os padrões de interferência nos anteparos desaparecem, como mostra a Fig. 11.

12- Realize as seguintes alterações nos dispositivos do interferômetro: retire o detector de demolição e altere os coeficientes de reflexão dos divisores de feixe de modo que $R_1 = R_2 = 0,50$. Para facilitar a visualização das detecções nos anteparos, marque a opção Linha Vertical, faça $\Delta t = 0$ e desmarque a opção Fótons Max.

12.1- O que representam as figuras que se formam nos anteparos?

12.2- O que podemos afirmar sobre o estado quântico do fóton após o primeiro divisor de feixe?

12.3- Como podemos explicar a formação dessas figuras nos anteparos?

13- Retire o segundo divisor de feixe do interferômetro (opção Divisor de feixe 2) e observe os anteparos.

13.1- Qual o papel desempenhado por esse dispositivo?

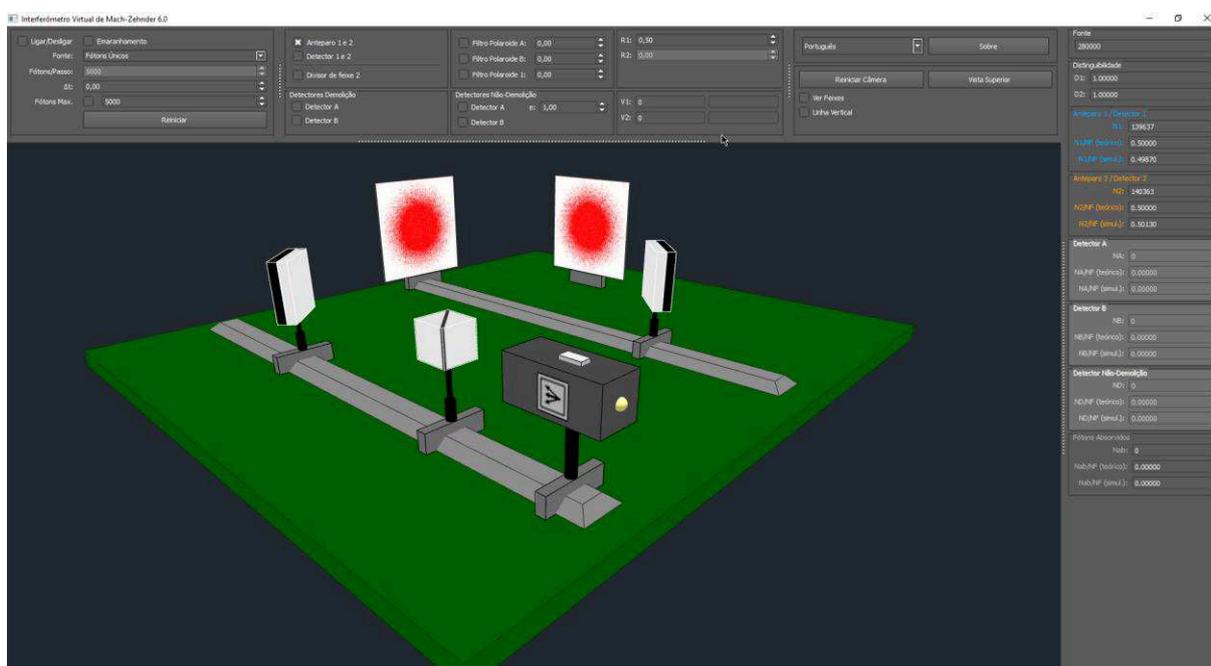


Fig. 11 – Os padrões de interferência são destruídos ao ser removido o segundo divisor de feixe (essa situação é análoga a fazer $R_2 = 0$).

A polarização, classicamente interpretada como a direção de oscilação do campo elétrico de uma onda eletromagnética, deve dar lugar à percepção de que os fótons assumem um estado de polarização ao interagir com um polaroide, determinado pela orientação do eixo de transmissão deste, especialmente se o cenário clássico tiver sido explorado previamente.

14- Altere os coeficientes de reflexão nos divisores de feixe fazendo $R_1 = 1$ e $R_2 = 0$ e insira um filtro polaroide orientado a zero graus no braço B (opção *Filtro Polaroides B*).

- 14.1- Qual a função de um filtro polaroide?
- 14.2- O que podemos afirmar sobre o estado de polarização dos fótons emitidos pela fonte?
- 15- Sem alterar as configurações do IVMZ, responda: o que você espera em relação às contagens no anteparo 1 se o filtro polaroide estiver orientado a 90 graus?
- 15.1- Coloque o polaroide orientado a 90 graus e verifique o que acontece.
- 16- Sem modificar as demais configurações do IVMZ, altere a orientação do polaroide para 60 graus. Como você explica o que acontece com as contagens no anteparo 1?
- 17- Mantendo o polaroide orientado a 60 graus faça, novamente, $R_1 = R_2 = 0,50$.
- 17.1- Como podemos relacionar a presença do polaroide com a alteração dos padrões de interferência nos anteparos?

Como o estado translacional dos fótons estará, inicialmente, associado ao braço B do interferômetro após a interação com o primeiro divisor de feixe, a inserção de um polaroide permitirá observar a redução das contagens no anteparo 1, independente da formação de padrão de interferência. Dada uma condição de polarização em que fótons são transmitidos no polaroide (fótons assumem o estado de polarização determinado pela direção do eixo de transmissão do polaroide em relação à direção horizontal), a relação com a lei de Malus se dá a partir da redução da probabilidade de detecção de fótons no anteparo (ou seja, diminui o número de fótons que serão detectados nos anteparos), de modo que a soma das detecções nos anteparos resulte em número menor do que o número de fótons emitido pela fonte (o polaroide absorve fótons). A Fig. 12 ilustra padrões de interferência com menor visibilidade e a redução na proporção de fótons detectados nos anteparos após a inserção do polaroide orientado a 60 graus.

- 18- Estabeleça uma relação entre as contagens no anteparo 1 e a lei de Malus ($I = I_0 \cos^2 \xi$).
- 19- No contexto da Física Quântica, como podemos interpretar as contagens no anteparo 1? Ou melhor, como podemos relacionar a lei de Malus com o que ocorre nesse anteparo?
- 20- Como se dá a conservação do número de fótons entre a emissão pela fonte e a detecção nos anteparos? Em outras palavras, como se pode estimar teoricamente o número de fótons absorvidos pelos polaroides, como mostrado na região na qual aparece a contagem de fótons?

Com a inserção do filtro polaroide e conseqüente alteração na probabilidade de incidência nos anteparos, há também alteração no padrão de interferência observado. Evidentemente, pode-se relacionar a intensidade das franjas de interferência nas diferentes regiões com as diferentes probabilidades de detecção de fótons – regiões onde há probabilidade máxima de incidência de fótons correspondem aos máximos de intensidade no regime clássico.

Embora a simulação do regime clássico permita uma organização inicial das ideias em torno do fenômeno envolvido, ao transitar para os domínios da FQ é preciso estar atento para que a mudança não se reduza a uma mera mudança no padrão linguístico. É imprescindível atuar para que os estudantes desenvolvam uma compreensão do fenômeno a partir de uma Física bastante diferente da abordagem clássica. Podemos pensar nestes dois cenários como

sendo complementares, no sentido em que ambos contribuem para o processo de apropriação do *software*, mas, ao mesmo tempo, há fronteiras que separam as duas teorias e estas devem ser consideradas.



Fig. 12 – Absorção de fótons pelo polaroide inserido no braço B do interferômetro e a formação de padrões de interferência com menor visibilidade.

Estes dois cenários foram planejados de tal forma que o estudo do regime clássico pode ser suprimido sem maiores prejuízos para a sequência das atividades. A opção por esta estrutura se justifica pelo fato de que se pode partir para o estudo da FQ sem, necessariamente, fazer referências à Física Clássica, deixando o cenário clássico como uma alternativa para casos em que o grau de dificuldade apresentado pelos estudantes na apropriação dos equivalentes quânticos dos conceitos estudados no regime clássico (relação intensidade-probabilidade, polarização) seja mais elevado. Isso não significa que desconhecamos, ou que estejamos ignorando, o percurso histórico da formulação proposta por Schrödinger, que incorpora analogias com a Óptica Ondulatória (KÖBERLE, 1979; SCHRÖDINGER, 1926). Trata-se de uma opção a ser feita por parte do professor.

IV. Atividade Didática II e o caráter complementar onda-partícula associado ao fóton

É importante (re)lembrar da atividade anterior o papel desempenhado por cada dispositivo no interferômetro. Particularmente, em relação aos divisores de feixe, é preciso reconhecer a natureza probabilística dos processos de reflexão e transmissão dos fótons pelos di-

visores de feixe, cujas respectivas probabilidades podem ser definidas no *software* variando-se R_1 e R_2 .

Na parte inicial dessa atividade, espera-se que os estudantes percebam (caso isso já não tenha ocorrido na primeira atividade didática) que as detecções nas portas e saída do interferômetro ocorrem individualmente e que, além disso, estas ocorrem somente no detector 1 (conforme ilustrado na Fig. 13).

- 1- Com o software aberto, certifique-se de que a fonte está na opção *Fótons Únicos*.
 - 2- Substitua os anteparos por detectores por meio da opção *Detector 1 e 2*.
 - 3- Na região em que se insere os parâmetros da fonte, coloque o valor 1 na opção *Fótons/Passo* e ligue a fonte. Observe os detectores e a contagem de fótons.
 - 3.1- O que ocorre com a contagem de fótons nos detectores?
 - 3.2- Explique por que somente a lâmpada do detector 1 acende.
- Dica: Observe o símbolo na fonte, que indica um feixe de fótons colimado.

Na situação aqui explorada, a fonte está emitindo um feixe aproximadamente colimado de fótons e os detectores estão localizados em uma posição tal que a incidência de fótons se dê na região central dos mesmos, que corresponde à região central dos anteparos que foram utilizados anteriormente. Como na região central do anteparo 1 havia um máximo de interferência (interferência construtiva), essa região deve indicar a presença de fótons quando a simulação é realizada em regime quântico. A parte central do anteparo 2 era uma região de interferência destrutiva e, assim, o detector 2 não acusará a detecção de fótons⁹. A intensidade do padrão de interferência (no regime clássico), que era nula para a região central do anteparo 2, pode ser associada à probabilidade de incidência de fótons nessa mesma região, que também será nula. Assim, não haverá detecção de fótons nesse dispositivo na região central (sendo o feixe de fótons muito estreito, todos os fótons serão acusados no detector 1).

Este tipo de análise possibilita que os estudantes compreendam as condições que permitem dizer se um padrão de detecções revela ou não interferência quando a fonte emite fótons únicos e há detectores nas saídas do interferômetro. Isso se faz necessário porque é na distribuição das detecções que os estudantes buscarão apoio para prosseguir na atividade.

Na sequência da atividade, ao questionar sobre a natureza do fenômeno, solicita-se, a partir de várias situações, que os estudantes recorram à distribuição das detecções para se certificarem se ocorre interferência e identifiquem o caráter manifestado pelo fóton (ondulatório ou corpuscular).

- 4- Considerando as condições do item anterior, ao se escolher um fóton qualquer detectado:
 - 4.1- É possível inferir qual dos braços (A ou B) ele tomou no interferômetro? Justifique.
 - 4.2- A distribuição das detecções revela interferência? Por quê?

⁹ Pode-se mostrar, pelo formalismo matemático da FQ, que $p_1 = 1$ e $p_2 = 0$ no caso em que $R_1 = R_2 = 1/2$ e quando o feixe de fótons é bastante estreito, ou seja, $\varphi \approx 0$ (NETTO, 2015, p. 47, expressões 8 e 9).

4.3- Este fenômeno tem natureza ondulatória ou corpuscular? Quais aspectos permitem fazer essa distinção?

Dica: A *distinguibilidade* se refere ao fato de o observador ter *informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons*. Distinguibilidade igual a zero significa que não há informação disponível e quando esta for 1 implica total informação disponível¹⁰.

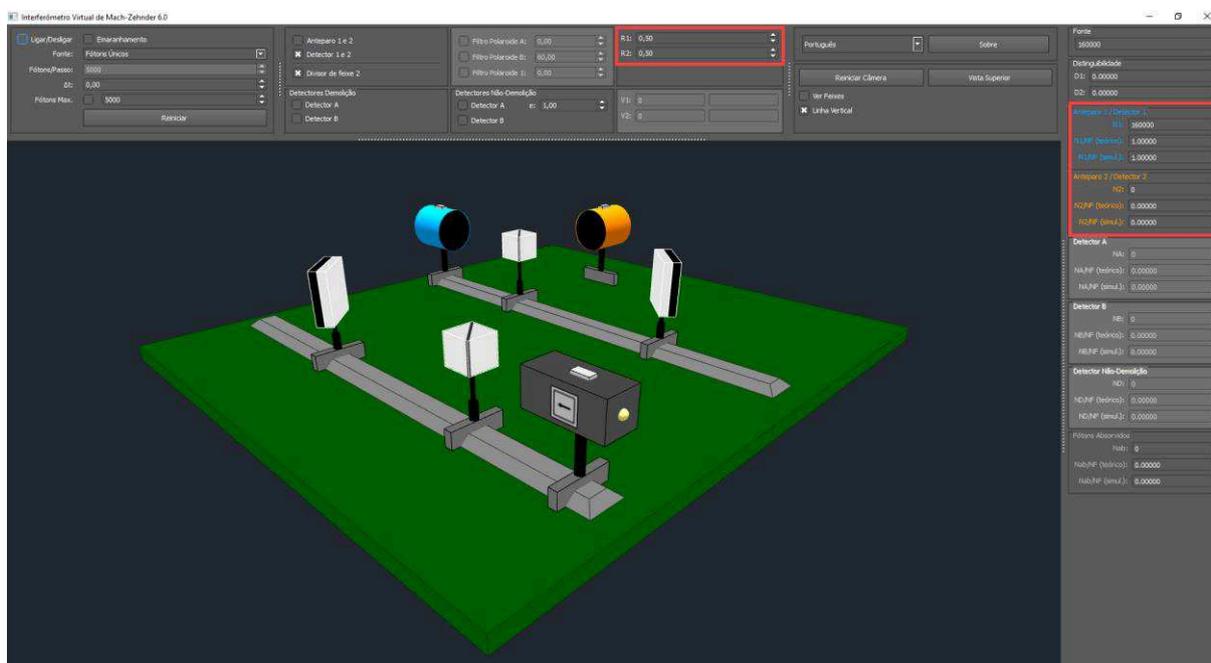


Fig. 13 – Apenas o detector 1 (azul) acusa a detecção de fótons. O fenômeno em questão manifesta a natureza ondulatória do fóton.

Com pequenas alterações na configuração do interferômetro, o fóton ora manifesta sua natureza corpuscular, ora sua natureza ondulatória, caracterizando-se como algo bastante contraintuitivo. No caso ilustrado na Fig. 14 manifesta-se o caráter corpuscular do fóton.

5- Na região *Detectors Demolição* marque a opção *Detector A* para inserir um detector de molição no braço A do interferômetro. Observe os detectores e a contagem de fótons.

5.1- Qual o caminho tomado por um fóton qualquer que chega aos detectores 1 e 2? Justifique.

5.2- A distribuição das detecções revela interferência? Por quê?

¹⁰ Poder associar o estado translacional do fóton a um braço A ou B pode ser entendido como uma analogia clássica a ‘percorrer uma trajetória definida’ no interferômetro. Entende-se aqui “trajetória” como a definição adotada por Kwiat (2009), associando a “trajetória do fóton” no interferômetro de Mach-Zehnder com a “existência de qualquer informação de caminho, rotulando o caminho tomado pelo fóton” (KWIAT, 2009, p. 429). A distinguibilidade é relacionada à quantidade de informação de caminho disponível e pode ser encarada como uma medida do grau de comportamento corpuscular de um objeto quântico (GREENBERGER e YASIN, 1988). Os quadrados da visibilidade e a distinguibilidade somados resultam na unidade, o que caracteriza a relação quantitativa de complementaridade, como será visto mais adiante.

5.3- O fenômeno observado tem natureza ondulatória ou corpuscular? Quais aspectos permitem fazer essa distinção?

5.4- Comparando com o caso em que não havia o detector demolição no braço A, como as alterações observadas nos detectores (portas de saída) podem estar relacionadas com o fato de o fenômeno ser ondulatório ou corpuscular?

6- Retire o detector do braço A e também o segundo divisor de feixe.

6.1- É possível inferir qual o caminho tomado por um fóton qualquer detectado no detector 1, ou no detector 2? Justifique.

6.2- Qual o comportamento do fenômeno observado? Há alguma inconsistência em relação às respostas dadas aos itens 4.3 e 5.3? Como você concebe a existência destes fenômenos?

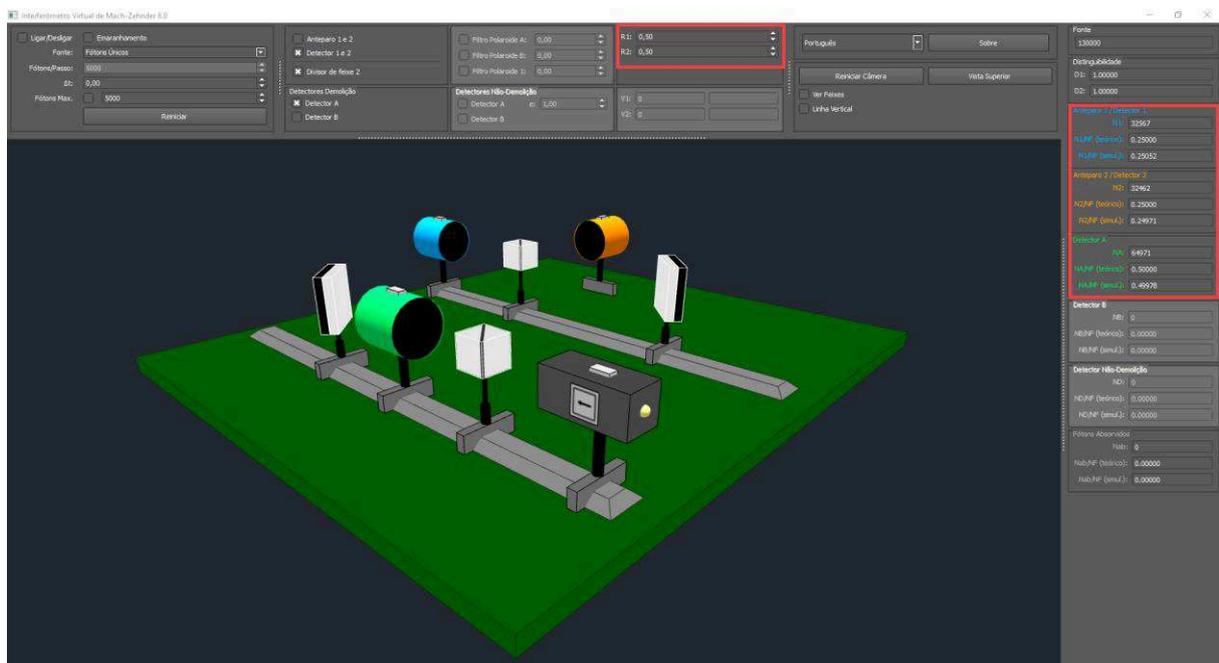


Fig. 14 – Detecção dos fótons pelo detector demolição (verde) posicionado no braço A e em ambos os detectores nas portas de saída do interferômetro. O fenômeno em questão manifesta a natureza corpuscular do fóton.

Com o objetivo de problematizar entre os estudantes a ideia de que o padrão de interferência pode ser destruído mesmo que o fóton não seja absorvido pelo detector (é o processo de medição que destrói o padrão, mesmo sem absorção) e possibilitar o aprofundamento das análises realizadas, novos conceitos, como distinguibilidade e visibilidade, são apresentados gradativamente.

7- Substitua os detectores nas portas de saída do interferômetro por anteparos e, repetindo as situações propostas nas questões 4, 5 e 6, analise a visibilidade dos padrões de interferência (indicados pelas quantidades \mathcal{V}_1 e \mathcal{V}_2).

Dica: A *visibilidade* refere-se ao *contraste do padrão de interferência* nos anteparos. Visibilidade igual a 1 significa que o padrão é perfeitamente nítido, apresentando contraste máximo entre as regiões de máximos e mínimos de interferência¹¹.

8- Como se comportam a visibilidade e a distinguibilidade dos padrões de detecção obtidos para as situações propostas nas questões 4, 5 e 6? Como podemos relacionar a visibilidade e a distinguibilidade com as alterações nesses padrões de detecção?

9- Recoloque o segundo divisor de feixe no interferômetro e insira um detector não-demolição (opção *Detectores Não-Demolição*) no braço A do interferômetro.

9.1- Comparando o padrão de detecções observado na situação proposta na questão 4, a presença do detector não-demolição promove alguma alteração no padrão de detecções? Justifique.

Para que a percepção dos estudantes sobre a relação entre esses conceitos não se restrinja a aspectos puramente quantitativos, a noção de informação disponível é constantemente explorada. Ao invés de simplesmente reconhecer distinguibilidade e visibilidade como fazendo parte de uma relação complementar, busca-se explorar aspectos qualitativos, relacionando-os com a possibilidade de inferir caminho para um fóton qualquer que foi detectado. A relação entre visibilidade e distinguibilidade é sintetizada por uma desigualdade, demonstrada independentemente por Jaeger *et al.* (1995) e Englert (1996), expressa por meio da relação $\mathcal{D}_i^2 + \mathcal{V}_i^2 \leq 1$, onde \mathcal{D}_i e \mathcal{V}_i são, respectivamente, a distinguibilidade e a visibilidade referentes ao anteparo i ($i = 1, 2$). No caso em que os objetos quânticos são todos preparados em um mesmo estado puro (caso considerado aqui), a equação anterior se reduz à igualdade, ou seja, $\mathcal{D}_i^2 + \mathcal{V}_i^2 = 1$. Nos casos explorados nessas atividades didáticas, todos os fótons são, por hipótese, preparados no estado puro $i\sqrt{R_1}|s_y\rangle + \sqrt{T_1}|s_x\rangle$ pelo primeiro divisor de feixe (NETTO, 2015). É possível, portanto, estender a complementaridade usualmente apresentada nos livros didáticos para além dos casos extremos em que há certeza total sobre o caminho associado ao estado translacional do fóton e nenhuma interferência ($\mathcal{V}_i = 0$ e $\mathcal{D}_i = 1$), que corresponde a um comportamento totalmente corpuscular, e a situação complementar, quando não há nenhuma informação sobre o caminho e o padrão de interferência tem máximo contraste ($\mathcal{V}_i = 1$ e $\mathcal{D}_i = 0$), que corresponde ao comportamento totalmente ondulatório. Nas situações intermediárias, para as quais $0 < \mathcal{V}_i < 1$ e $0 < \mathcal{D}_i < 1$ (obedecendo a relação $\mathcal{D}_i^2 + \mathcal{V}_i^2 = 1$), o comportamento dos fótons será parcialmente corpuscular e parcialmente ondulatório, podendo predominar um ou outro dependendo dos valores da visibilidade e distinguibilidade para o anteparo correspondente. Esses são os chamados *fenômenos intermediários*, propostos inicialmente por Wootters e Zurek (1979) no contexto da dupla fenda. Para o IVMZ com divisores de feixe cujos coeficientes de reflexão são definidos por R_1 e R_2 (e coeficientes de transmissão $T_1 = 1 - R_1$ e $T_2 = 1 - R_2$), pode-se mostrar que a visibilidade e a distinguibilidade são dadas por

¹¹ A visibilidade (contraste do padrão de interferência) pode ser encarada como uma medida do grau de comportamento ondulatório do fóton no interferômetro (capacidade de formar padrões de interferência).

$$\mathcal{V}_1 = \frac{2\sqrt{R_1 R_2 T_1 T_2}}{R_1 T_2 + R_2 T_1}; \quad (1)$$

$$\mathcal{D}_1 = \frac{|R_1 T_2 - R_2 T_1|}{R_1 T_2 + R_2 T_1}, \quad (2)$$

para o anteparo 1, e

$$\mathcal{V}_2 = \frac{2\sqrt{R_1 R_2 T_1 T_2}}{R_1 R_2 + T_1 T_2}; \quad (3)$$

$$\mathcal{D}_2 = \frac{|R_1 R_2 - T_1 T_2|}{R_1 R_2 + T_1 T_2}, \quad (4)$$

para o anteparo 2. Com as expressões acima, pode ser facilmente verificada a igualdade $\mathcal{D}_i^2 + \mathcal{V}_i^2 = 1$ para ambos os anteparos.

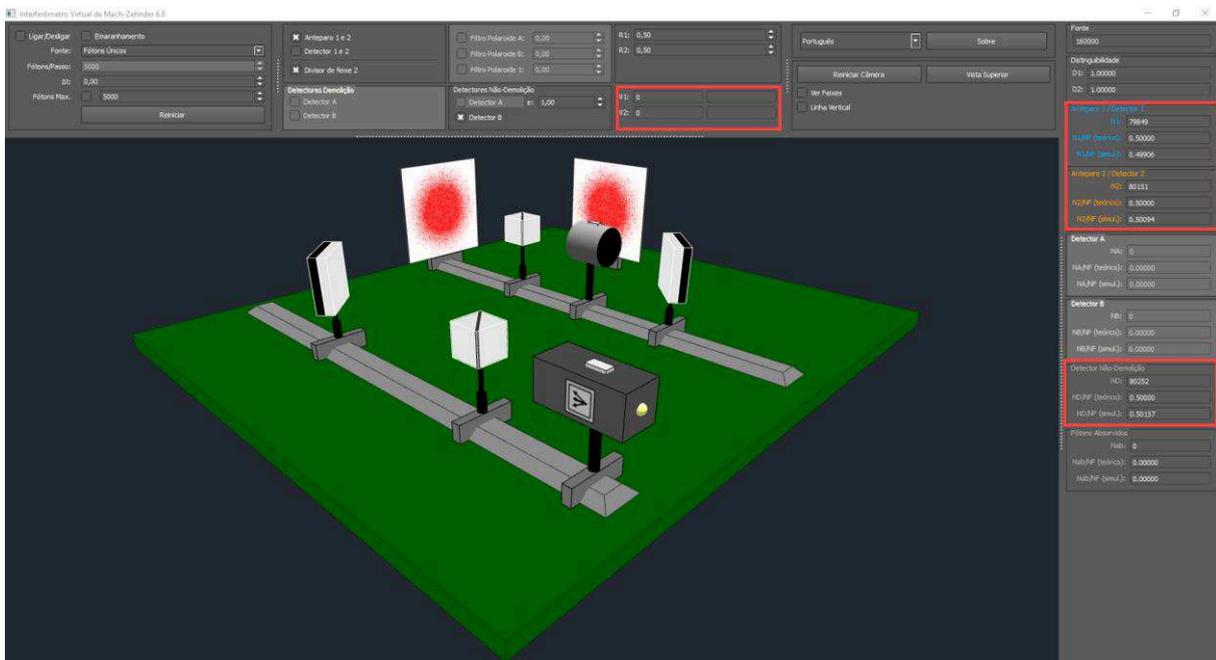


Fig. 15 – Detector não-demolição no braço B e a destruição dos padrões de interferência nos anteparos.

A Fig. 15 ilustra o cenário obtido com a inserção de um detector não-demolição no braço B do interferômetro.

9.2- Comparando os padrões de detecção obtidos a partir da inserção do detector não-demolição com as detecções obtidas em diferentes contextos (questões 4, 5 e 6), qual explicação podemos dar para as alterações ocorridas? Como você interpreta o comportamento dos

fenômenos a partir da informação disponível em relação ao caminho tomado pelos fótons nas diferentes situações? Como os valores de distinguibilidade e visibilidade relacionam-se entre si? Explique em termos da informação disponível ao observador.

Dica: O detector não-demolição é capaz de detectar os fótons sem alterar o seu estado translacional (não absorve o fóton).

No caso em que detectores estão nas portas de saída ao invés de anteparos, o único recurso semiótico disponível para perceber a interferência são as contagens nesses dispositivos e o sinal da lâmpada acendendo a cada detecção. Como recurso auxiliar, os estudantes são orientados a interpretar os valores de distinguibilidade. Quando os detectores são substituídos por anteparos, a visualização dos padrões de detecção e as alterações neles ocorridas podem também se constituir em uma forma de representação bastante útil na discussão da natureza do fóton. Entretanto, com o objetivo de minimizar chances de construção de análises apressadas por parte dos estudantes, privilegiando explicações concentradas excessivamente no recurso visual da representação de padrões de interferência com contraste variável, é solicitado que estas sejam construídas a partir de aspectos que envolvam conceitos importantes que constituem a natureza quântica do fenômeno (conceito de distinguibilidade e visibilidade, por exemplo). É por isso que as primeiras discussões são realizadas com o uso de detectores nas portas de saída do interferômetro. A visualização dos padrões de interferência vem em um segundo momento, justamente para não limitar as discussões à mediação por meio de recursos semióticos visuais, incentivando o uso articulado da visualização com o conceito de distinguibilidade e visibilidade.

A utilização de detectores demolição e não-demolição nos braços do interferômetro, assim como a retirada do segundo divisor de feixe se constituem em alternativas que buscam criar as primeiras situações que conduzem os estudantes a perceber de forma mais consistente o caráter dual do fóton na versão forte da dualidade (PESSOA JR., 2005). Particularmente, em relação à inserção de detectores não-demolição e análise do comportamento dos fótons, abre-se espaço para explorar temas atuais de FQ relacionados aos processos de medição. Sua presença no interferômetro, apesar de não alterar a distribuição de fótons entre os dois anteparos, afeta a visibilidade dos padrões de interferência (pois introduz informação sobre o caminho associado ao estado translacional do fóton).

Até este ponto da atividade didática, é possível que os estudantes deem conta das explicações concebendo a natureza corpuscular e a natureza ondulatória do fóton segundo uma perspectiva que as reconhece tal como é sugerido em Tipler e Llewellyn (2006), que considera que ambas não podem ser observadas simultaneamente. Para romper com esta concepção introduzindo uma perspectiva mais contemporânea, explora-se, a partir da questão número 10, os *fenômenos intermediários*.

10- Retire o detector não-demolição, altere o número de fótons emitidos para 1000 fótons/segundo e substitua os detectores nas portas de saída por anteparos.

11- Ao se observar os anteparos e as respectivas contagens de fótons, verifica-se a formação do mesmo padrão de interferência obtido anteriormente.

12- Altere o coeficiente de reflexão do primeiro divisor de feixe de modo que $R_1 = 0,80$.

12.1- Compare o padrão de detecções formado a partir dessa alteração com aquele obtido para $R_1 = 0,50$. Quais as implicações da alteração realizada em R_1 em termos de informação disponível sobre o caminho tomado pelos fótons?

12.2- O fenômeno observado tem natureza ondulatória ou corpuscular?

12.3- Qual o impacto da alteração no coeficiente R_1 em termos de visibilidade do padrão obtido nos anteparos?

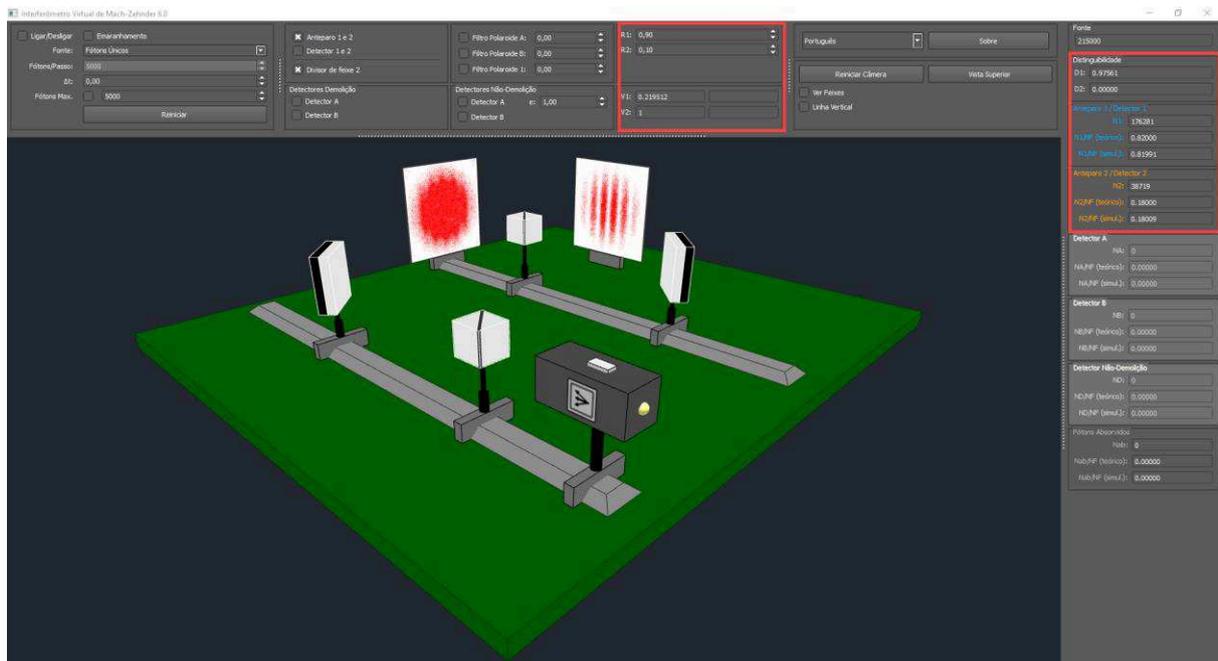


Fig. 16 – Fenômeno intermediário obtido com $R_1 = 0,90$ e $R_2 = 0,10$. No anteparo 2 a visibilidade é 1,00 e a distinguibilidade é nula (comportamento totalmente ondulatório). No entanto, no anteparo 1 a visibilidade é bem menor e está em torno de 0,22, enquanto que a distinguibilidade é aproximadamente 0,98 (comportamento predominantemente corpuscular).

A variação nos valores dos coeficientes de reflexão dos divisores de feixe (e, por conseguinte, de transmissão) implica alterar as probabilidades desses eventos ocorrerem, permitindo obter padrões de interferência cujas distinguibilidades e visibilidades assumem valores intermediários, ou seja, entre zero e um. Isso pode ocorrer tanto em um anteparo quanto em ambos. Na Fig. 16 essa situação é mostrada, correspondendo aos seguintes itens do roteiro:

13- Utilize agora $R_1 = 0,90$ e $R_2 = 0,10$ e compare a visibilidade e a distinguibilidade em cada anteparo.

13.1- O padrão de detecções nos anteparos revela um fenômeno ondulatório ou corpuscular? Explique em termos da informação disponível ao observador quanto ao caminho tomado pelos fótons no interferômetro.

14- Mantenha $R_2 = 0,10$, altere R_1 para $0,10$ e observe a visibilidade e a distinguibilidade em cada anteparo.

14.1- Compare os padrões obtidos nos anteparos com aqueles obtidos na questão 13 e discuta-os em termos da visibilidade e da informação disponível ao observador quanto ao caminho tomado pelos fótons no interferômetro.

Na Fig. 16, o anteparo 2 (anteparo mais à direita) permite caracterizar a natureza ondulatória, enquanto que na Fig. 17, isso ocorre para o anteparo 1 (anteparo mais à esquerda), dependendo dos valores atribuídos aos coeficientes de reflexão dos divisores de feixe. Para os fótons que chegam nesses anteparos, não há qualquer informação disponível sobre caminho. Entretanto, não se pode dizer o mesmo sobre o outro anteparo nestas mesmas figuras. O anteparo 1 na Fig. 16 e o anteparo 2 na Fig. 17 exibem padrões característicos de fenômenos intermediários de interferência quântica, indicando que há *informação parcial* disponível sobre o caminho associado aos fótons que neles são detectados, predominando bastante o comportamento corpuscular (distinguibilidade próxima de um). Os valores intermediários para a visibilidade e distinguibilidade nesses anteparos auxiliam na interpretação desses fenômenos.

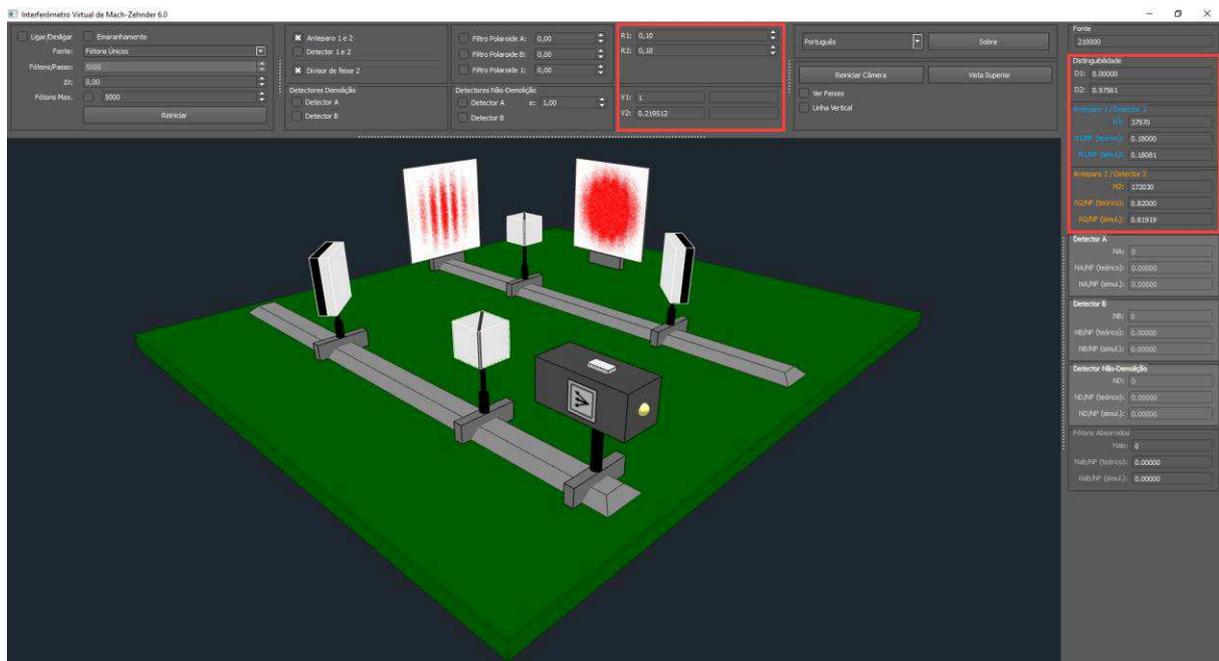


Fig. 17 – Fenômeno intermediário obtido com $R_1 = R_2 = 0,10$. Nesse caso, é no anteparo 1 que a visibilidade é $1,00$ e a distinguibilidade é nula (comportamento totalmente ondulatório). No anteparo 2, a visibilidade fica em torno de $0,22$, enquanto que a distinguibilidade é aproximadamente $0,98$ (comportamento predominantemente corpuscular).

Os seguintes itens permitem estudar uma situação em que há fenômeno intermediário em ambos os anteparos:

15- Altere os valores dos coeficientes de reflexão para $R_1 = 0,85$ e $R_2 = 0,35$.

15.1- O que significam os valores intermediários para a distinguibilidade e a visibilidade em cada anteparo?

15.2- A natureza dos fenômenos é ondulatória ou corpuscular? Que explicação podemos dar para o fenômeno observado?

15.3- Como podemos conciliar esses padrões?

Para o caso ilustrado na Fig. 18, em cada um dos anteparos pode-se visualizar um padrão que manifesta tanto a natureza corpuscular do fóton (padrão com baixa visibilidade) quanto sua natureza ondulatória (vê-se um padrão de interferência ao fundo).

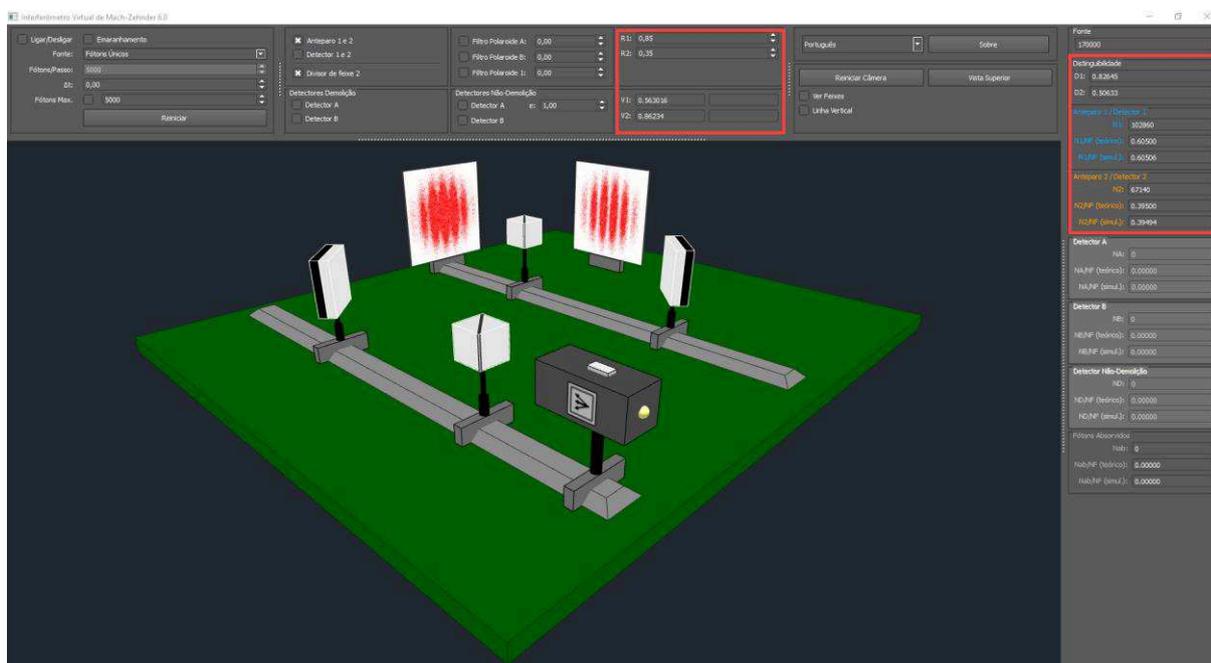


Fig. 18 – Fenômeno intermediário obtido com $R_1 = 0,85$ e $R_2 = 0,35$. Nesse caso, em ambos os anteparos a visibilidade e a distinguibilidade assumem valores intermediários. Para o anteparo 1 temos $\mathcal{V}_1 \approx 0,56$ e $\mathcal{D}_1 \approx 0,83$ (comportamento predominantemente corpuscular) e para o anteparo 2, $\mathcal{V}_2 \approx 0,86$ e $\mathcal{D}_2 \approx 0,51$ (comportamento predominantemente ondulatório).

A partir do estudo de situações como as ilustradas nas Figs. 16, 17 e 18 é que se explora a complementaridade onda partícula, introduzida por Bohr, em uma perspectiva mais moderna que inclua fenômenos intermediários e não apenas casos extremos. Segundo esta interpretação, para um mesmo fenômeno físico há duas descrições possíveis e ambas são necessárias para se representar completamente o sistema, ou seja,

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

Assim, a primeira atividade (seção III) estabelece o plano de intersubjetividade, de forma que estudantes e instrutor tenham uma espécie de *sintonia* (WERTSCH, 1984) ao compartilhar os significados envolvidos nos aspectos lá trabalhados (funcionamento do IVMZ e seus dispositivos, conceitos de interferência clássica e quântica, polarização, natureza probabilística da interação do fóton com dispositivos do IVMZ e outros), os quais são fundamentais para as atividades seguintes. Na segunda atividade (seção IV), paulatinamente esses conceitos vão sendo aprofundados enquanto novos são introduzidos, permitindo que seja explorada a complementaridade onda-partícula em um viés quantitativo e mais contemporâneo – ver equações (1) a (4).

V. Atividade didática III: simulação do emaranhamento quântico

É possível também explorar aspectos ainda mais contraintuitivos da FQ, como o fenômeno do emaranhamento quântico. Em 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen propuseram um experimento mental (conhecido como paradoxo EPR), no qual defendiam que a Mecânica Quântica era uma teoria física incompleta (EINSTEIN *et al.*, 1935). Propunham que esta era uma teoria realista e local e, por isso, não descrevia adequadamente os sistemas quânticos como, por exemplo, a medição realizada em partes separadas do sistema (para quaisquer distâncias). Tal afirmação fez com que Bohr (1935), defensor de outra perspectiva filosófica para a FQ, fizesse sérias objeções à proposta de EPR, dando continuidade a um longo debate com Einstein.

O tipo de emaranhamento que foi proposto no IVMZ é o emaranhamento em estados de polarização do fóton. Nessa situação, a fonte emite fótons individuais polarizados a 45 graus, e o dispositivo¹² com formato de Y (daqui para frente chamado *dispositivo Y* – ver Fig. 20) converte cada um destes fótons em um par¹³ de fótons emaranhado em estados de polarização, conservando o *momentum* linear, direcionando um fóton para cada braço do interferômetro (inserindo separação espacial) com emaranhamento máximo. Assim, para introduzir a simulação e discutir o fenômeno de emaranhamento em estados de polarização, parte-se de um contexto semelhante ao que foi explorado no cenário quântico da primeira atividade didá-

¹² Por hipótese, este dispositivo contém um cristal PDC tipo-I (*Parametric Down Converter*), direcionador e compensador de fase, permitindo criação de pares com emaranhamento máximo. Esse processo foi desenvolvido por Paul G. Kwiat e seu grupo, em 1999 (KWIAT *et al.*, 1999).

¹³ Isto é possível com a inserção de dois cristais não-lineares superpostos no interferômetro, resultando em um processo conhecido como conversão paramétrica descendente de tipo I (EDAMATSU, 2007, p. 7179).

tica, em que foram inseridos polaroides nos braços do interferômetro, tal como mostrado na Fig. 19.

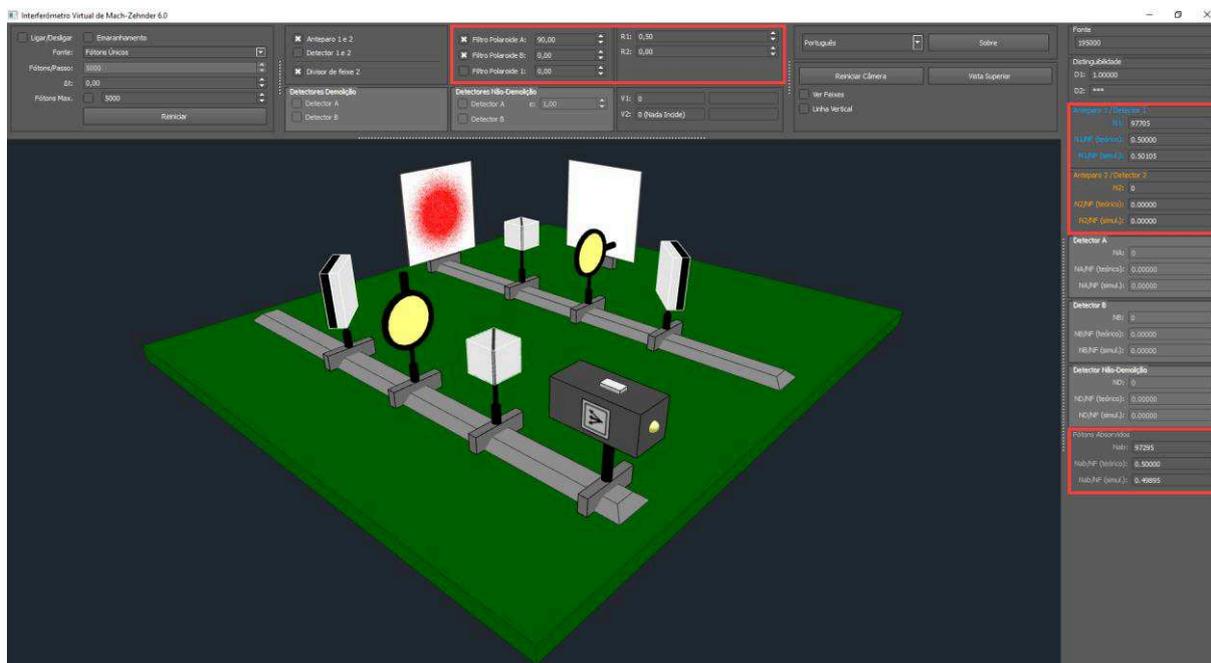


Fig. 19 – Absorção dos fótons no polaroide cujo eixo de transmissão está orientado a 90 graus.

Como todos os questionamentos nesta atividade estão relacionados à observação e interpretação de contagens nos detectores, a mesma está estruturada em torno da preparação de diferentes cenários, realização de uma previsão por parte dos estudantes e comparação com o resultado obtido a partir da simulação no *software*.

- 1- Com o *software* aberto, certifique-se de que a fonte está na opção *Fótons Únicos*.
- 2- Considere a seguinte configuração, mas não execute a simulação: $R_1 = 0,50$ e $R_2 = 0,00$, filtro polaroide no braço A orientado a 90 graus e no braço B, orientado a zero graus.
 - 2.1- Como você espera que ocorra a distribuição das detecções nos anteparos?
- 3- Ligue a fonte e tente explicar o que você observou.

O simples fato da probabilidade de transmissão do segundo divisor de feixe ser igual à unidade (o mesmo efeito pode ser obtido retirando-se esse dispositivo do interferômetro), já permite ter certeza sobre o caminho associado ao fóton que incide no anteparo – sem os polaroides, fótons que incidissem no anteparo 1 teriam seu estado translacional unicamente associado ao caminho B e os que incidissem no anteparo 2, ao caminho A. Nesse caso, após a interação com o primeiro divisor de feixe, configurado com igual probabilidade de reflexão e transmissão, aproximadamente 50 por cento dos fótons têm seus estados translacionais associados a cada um dos braços do interferômetro. Os fótons detectados no anteparo 1 estariam

associados ao braço B do interferômetro e os detectados no anteparo 2 estariam associados ao braço A. Com a inserção de filtros polaroides, é preciso considerar também o estado de polarização assumido pelos fótons após esses dispositivos. Como o estado de polarização dos fótons emitidos pela fonte é, por definição, horizontal, com a configuração dos polaroides mostrada na Fig. 19 não haverá detecções no anteparo 2, visto que os fótons são absorvidos no polaroide que se encontra no braço A (aproximadamente a metade da quantidade de fótons emitidos pela fonte), o que equivale a bloquear esse caminho. Como consequência, não há formação de padrão de interferência no anteparo 1. Desta forma, retoma-se o estudo da polarização, reforçando-se a condição para transmissão ou absorção dos fótons nos polaroides.

Após a constatação de que os fótons serão absorvidos quando seu estado de polarização corresponder ao caso clássico em que a direção de oscilação do campo elétrico é perpendicular à direção do eixo de transmissão do polaroide, parte-se para a simulação com pares de fótons. Porém, antes de apresentar as atividades envolvendo estados emaranhados, são necessárias algumas considerações. O par é produzido de forma que os fótons, rotulados pelos índices 1 e 2, tenham a mesma polarização, podendo esta ser horizontal ou vertical – cada um desses estados do par tem probabilidade 1/2. O estado emaranhado em polarização é, por hipótese, obtido pela conversão paramétrica descendente do tipo I, que pode criar estados em configurações do tipo $(1/\sqrt{2})(|h\rangle_1 \otimes |h\rangle_2 + e^{i\varphi}|v\rangle_1 \otimes |v\rangle_2)$, podendo a fase φ ser facilmente controlada no experimento (EDAMATSU, 2007; KWIAT *et al.*, 1999). Aqui, $|h\rangle$ e $|v\rangle$ representam os estados quânticos de polarização horizontal e vertical, respectivamente. Pode-se configurar cada dispositivo para que se tenha $\varphi = 0$, de forma que o estado de polarização do par emaranhado seja $(1/\sqrt{2})(|h\rangle_1 \otimes |h\rangle_2 + |v\rangle_1 \otimes |v\rangle_2)$. Assim, o estado global após o dispositivo Y será dado por

$$|\Psi_Y\rangle = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (|s_x\rangle_1 \otimes |s_y\rangle_2 + |s_x\rangle_2 \otimes |s_y\rangle_1) \right] \otimes \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (|h\rangle_1 \otimes |h\rangle_2 + |v\rangle_1 \otimes |v\rangle_2) \right]. \quad (5)$$

O primeiro fator descreve o estado translacional do par de fótons após a interação com o dispositivo Y. Este fator basicamente diz que há uma probabilidade 1/2 do par ser criado de forma que o estado translacional do fóton 1 esteja associado ao braço A e o do fóton 2 ao B e 1/2 de que o estado translacional do fóton 2 esteja associado ao braço A e o do fóton 1 ao B. O segundo fator descreve o estado de polarização do par, havendo uma probabilidade 1/2 de ser preparado com polarização horizontal e 1/2 na vertical. Como o estado de polarização do par é simétrico, o fato dos fótons serem bósons implica no estado translacional ser também simétrico (por isso o sinal +), de forma que o estado global $|\Psi_Y\rangle$ seja simétrico. O símbolo \otimes significa *produto externo* e deve ser empregado porque há um espaço de Hilbert para cada fóton do par (\mathcal{H}_1 e \mathcal{H}_2), além de um espaço de Hilbert para estados translacionais e outro para estados de polarização (\mathcal{H}_T e \mathcal{H}_P , respectivamente). Sendo o estado do par dado por (5), pode-se mostrar que a probabilidade dos detectores A e B dispararem ao mesmo tempo (cada um acusa um fóton do par – o que se chama *coincidência*) após a interação com os

polaroides é $p_{AB} = (1/2) \cos^2(\xi_A - \xi_B)$, onde ξ_A e ξ_B são, respectivamente, os ângulos de orientação dos polaroides posicionados nos braços A e B. Pode-se mostrar também que a probabilidade p_A de apenas o detector A disparar é $p_A = (1/2) \sin^2(\xi_A - \xi_B)$, sendo esta igual à probabilidade p_B de apenas o detector B disparar. Por fim, pode-se também mostrar que a probabilidade p_{abs} do par ser absorvido pelos polaroides (e nenhum dos dois detectores disparar) é igual à p_{AB} . Na atual versão do *software*, apenas as coincidências são registradas.

A Fig. 20 ilustra o *layout* do *software* para simulação do fenômeno do emaranhamento quântico.

4- Marque a opção *Emaranhamento* e observe atentamente os dispositivos presentes no interferômetro, procurando identificá-los. O primeiro divisor de feixe foi substituído por um dispositivo capaz de produzir um par de fótons, a partir de apenas um fóton emitido pela fonte. Isso pode ser feito, por exemplo, incidindo um feixe *laser* sobre um cristal não-linear (KDP). Este transforma cada fóton incidente em dois fótons, gerados simultaneamente com, aproximadamente, metade da energia do fóton incidente e que tomam caminhos correlacionados (conversão paramétrica descendente) (PESSOA JR., 2005, p. 11).

De forma semelhante à introdução da primeira atividade didática, procura-se negociar o estabelecimento de um plano de intersubjetividade entre o instrutor e os estudantes para que estes possam reconhecer as alterações promovidas no *software* para a simulação do emaranhamento quântico, ganhando autonomia para executar ações no sentido de gerar e interpretar resultados. Inseridos no cenário em que a simulação ocorre com pares de fótons, são exploradas situações em que os estudantes devem relacionar a presença dos polaroides nos braços do interferômetro com as contagens de pares de fótons nos detectores, como mostram as atividades guiadas abaixo.

5- Mantenha a fonte desligada. Com os dois polaroides orientados a zero graus, como você espera que ocorram as detecções?

6- Na opção *Fótons/Passo*, digite 1.

7- Ligue a fonte e observe as contagens de fótons nos detectores e nos polaroides.

7.1- Como se relacionam o número de fótons emitidos pela fonte e o número de pares detectados?

8- Repita estes procedimentos para os casos em que ambos os polaroides estão a 45 graus e em seguida ambos a 90 graus. Para isso, primeiramente descreva suas previsões sobre como espera que se relacionem as contagens nos detectores e polaroides, mantendo a fonte desligada. Somente após registrar suas previsões em cada caso ligue a fonte. A partir do que você observou, como se relacionam o número de fótons emitidos pela fonte e o número de pares detectados em cada caso?

A sequência da atividade ocorre mantendo-se a mesma disposição dos componentes no interferômetro, alterando-se apenas a direção do eixo de transmissão dos polaroides. Tanto para o caso em que ambos os polaroides estão orientados a zero graus quanto para o caso em

que a orientação é a 45 graus ou a 90 graus haverá uma probabilidade de cinquenta por cento de detecção simultânea do par nos detectores. Para os polaroides orientados a zero graus, os detectores irão acusar a detecção somente quando o estado de polarização do par for horizontal e quando os polaroides estiverem orientados a 90 graus, as detecções ocorrerão apenas para os pares de fótons cuja direção de polarização é vertical, o que acontece com, aproximadamente, cinquenta por cento dos pares produzidos em ambos os casos.



Fig. 20 – Cerca de cinquenta por cento dos pares de fótons são transmitidos nos polaroides cujo eixo de transmissão está orientado a 45 graus.

Para um polaroide orientado a 45 graus, pode haver transmissão do fóton tanto para o estado de polarização horizontal quanto para o vertical. A partir da lei de Malus, constata-se que a probabilidade de transmissão de um fóton cujo estado de polarização é $|h\rangle$ ou $|v\rangle$ quando interage com um polaroide orientado a 45 graus é de 0,5 (conforme representado na Fig. 20). Apesar de dar conta da explicação das detecções para essas configurações de polaroides, este tipo de análise é limitado e não se aplica a outros casos, como será visto mais adiante.

9- Mantendo a fonte desligada, o que você espera em relação às contagens nos detectores na situação em que um dos polaroides está a zero graus e o outro a 90 graus? E quando um está 45 e outro a 135 graus?

Muito possivelmente o modelo explicativo construído pelos estudantes acabará falhando, pois estão diante de um cenário totalmente novo e contraintuitivo, que não se evidencia plenamente nas primeiras atividades propostas. Os roteiros são concebidos assim proposi-

talmente, de forma a provocar um posterior choque entre as previsões dos estudantes e os resultados obtidos quando o par é emaranhado, ou seja, preparado no estado dado por (5). Não há como prever quais modelos explicativos serão esboçados pelos estudantes, mas, possivelmente, surgirão proposições fundamentadas na ideia de que o par emaranhado se comporta de forma similar ao par classicamente correlacionado. O que contribui para isso é a manutenção do raciocínio utilizado anteriormente, onde se verifica que metade da quantidade de pares de fótons que interage com os polaroides é absorvida. Como a polarização do par varia evento por evento (aproximadamente metade das vezes com estado de polarização vertical e aproximadamente metade das vezes horizontal), os estudantes poderão fazer previsões corretas mesmo sem compreender completamente o fenômeno. Quando os polaroides estão orientados a zero graus, por exemplo, os estudantes podem considerar que os fótons que serão transmitidos são aqueles que tem estado de polarização horizontal (aproximadamente a metade, portanto). O cenário apresentado exige, neste primeiro momento, apenas uma previsão por parte dos estudantes.

Vale destacar que o sistema quântico a ser estudado é um par emaranhado de fótons interagindo com um par de polaroides. O tratamento, portanto, deve ser dado ao par de fótons como um objeto quântico único (o estado de polarização em (5) é um estado não-separável), não apenas no contexto em que os polaroides estão com os eixos de transmissão cruzados, mas também nos casos anteriores (embora tal necessidade estivesse mascarada).

Para problematizar ainda mais a questão analisada, ainda sem executar a simulação com os polaroides a zero e 90 graus, propõe-se a análise de um experimento mental, conforme ilustrado na Fig. 21.

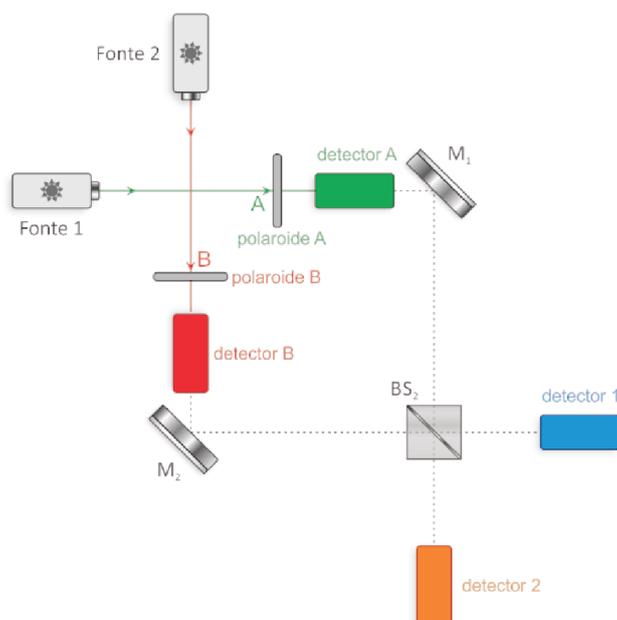


Fig. 21 – Fontes independentes emitindo fótons únicos e com estado de polarização variável. O fóton rotulado com 1 é emitido pela fonte 1 e o fóton rotulado com 2, emitido pela fonte 2.

Ao invés de uma única fonte emitindo fótons que são convertidos em pares de fótons emaranhados, a configuração apresentada é composta por fontes independentes, que emitem fótons únicos simultaneamente e com estado de polarização variável evento a evento, tal que ambas emitam aleatoriamente fótons no estado $|h\rangle$ e $|v\rangle$, cada um com probabilidade $1/2$ de ocorrência. Além disso, há um mecanismo clássico que introduz uma correlação de natureza clássica¹⁴ entre os estados de polarização dos fótons: quando uma fonte emite um fóton no estado $|h\rangle$, a outra simultaneamente emite um fóton nesse mesmo estado, ocorrendo o mesmo quando o fóton for emitido no estado $|v\rangle$. Assim, a natureza da correlação entre os estados de polarização dos fótons emitidos no experimento proposto na Fig. 21 é bem distinta da que existe quando um par é preparado no estado definido em (5). A possibilidade de executar a simulação com o *layout* proposto na Fig. 21 não existe no *software*, tratou-se de uma proposta de atividade *ad hoc*. O intuito é que seja solicitado aos estudantes que respondam aos itens para o *layout* modificado da Fig. 21 e façam o mesmo para quando o par é emaranhado (*layout* mostrado na Fig. 20), contrapondo os resultados. Os itens são os seguintes:

10- Antes de prosseguir, vamos analisar outro contexto. Considere a seguinte alteração no interferômetro, conforme a figura: ao invés de uma fonte apenas, são utilizadas duas fontes que emitem fótons com a mesma polarização (quando uma fonte emite um fóton com polarização horizontal, a outra também emite com polarização horizontal, o mesmo ocorrendo para o caso da emissão de fótons com polarização vertical). Aproximadamente metade das vezes os fótons são produzidos com polarização horizontal e metade das vezes com polarização vertical. O que se esperaria em relação à contagem de fótons detectados simultaneamente se ambos os polaroides estivessem orientados:

- 10.1- A zero graus?
- 10.2- A 90 graus?
- 10.3- A 45 graus?
- 10.4- Um a zero e o outro a 90 graus?
- 10.5- Um a 45 e outro a 135 graus?

¹⁴ Placas de meia-onda podem transformar a polarização horizontal em vertical, quando alinhadas no ângulo adequado. Assim, as fontes podem emitir fótons sempre com estado de polarização $|h\rangle$, que passam por esse tipo de placa na saída de cada fonte. Suponha que as placas sejam acopladas, de forma que sejam rotacionadas sempre juntas e que essa rotação seja automaticamente gerada por um dispositivo eletrônico configurado para que as gire sempre de forma randômica em aproximadamente metade dos eventos de emissão de fótons, em um ângulo tal que o estado de polarização dos fótons na saída seja convertido no estado $|v\rangle$. Assim, o estado de polarização do par será $|h\rangle_1 \otimes |h\rangle_2$ em aproximadamente metade dos eventos de emissão de pares e $|v\rangle_1 \otimes |v\rangle_2$ nos demais eventos (também aproximadamente metade). A correlação que é inserida aqui tem natureza clássica, pois ocorre entre as placas de meia-onda (que são acopladas). Esse sistema produz uma mistura estatística de estados de polarização do par de fótons, denominado *estado misto*, bastante distinto do estado definido em (5). Esse estado misto só pode ser expresso por meio do *operador densidade* (pode-se obter facilmente a probabilidade de detecção conjunta do par a partir desse operador e do operador que representa a ação dos polaroides nos estados de polarização do par, mas isso não será feito aqui). Nesse caso os resultados não costumam parecer tão contraintuitivos aos estudantes que entendem a relação da lei de Malus com as probabilidades de transmissão e absorção de fótons por um polaroide.

Apesar da aparente semelhança em relação aos dispositivos utilizados nessa nova configuração do interferômetro, o problema físico envolvido é completamente diferente. Têm-se, agora, dois fótons com estados de polarização classicamente correlacionados em que a física que governa os fenômenos envolvidos pode ser aplicada para cada fóton individualmente para descrever a atuação dos polaroides nos braços do interferômetro. Facilmente conclui-se que metade dos fótons serão transmitidos e chegarão aos detectores em cada caso. Nessa situação, a probabilidade de que o par seja transmitido por ambos os polaroides, provocando detecção simultânea, é dada por $p_{AB} = (1/2) \cos^2 \xi_A \cos^2 \xi_B + (1/2) \sin^2 \xi_A \sin^2 \xi_B$. O primeiro termo é a probabilidade de transmissão conjunta quando o par é criado no estado $|h\rangle$, dado pelo produto das seguintes probabilidades: do par ser criado nesse estado de polarização (1/2), do fóton 1 ser transmitido pelo polaroide A ($\cos^2 \xi_A$) e do fóton 2 ser transmitido pelo polaroide B ($\cos^2 \xi_B$). Raciocínio análogo permite concluir que o segundo termo é a probabilidade de transmissão conjunta do par quando ele é criado no estado $|v\rangle$. Note que essa probabilidade é bastante distinta da probabilidade $p_{AB} = (1/2) \cos^2(\xi_A - \xi_B)$, no caso em que o par é criado em um estado emaranhado.

A análise desse interferômetro modificado visa possibilitar que os estudantes se deem conta de que os sistemas envolvidos são distintos e que percebam por que podem falhar suas previsões para o caso em que são emitidos pares de fótons emaranhados no estado dado por (5). Intencionalmente foram selecionadas, dentre cinco situações distintas, três para as quais as probabilidades de detecção conjunta sejam as mesmas para o *layout* modificado e para quando o par é emaranhado.

Após os estudantes explorarem o contexto proposto no experimento mental, tal como representado na Fig. 21, estes devem retornar à simulação no interferômetro com o par emaranhado, conforme sugerido no roteiro.

11- Vamos agora retornar ao contexto proposto na questão 9. Com um polaroide orientado a zero graus e o outro a 90 graus, ligue a fonte e observe as contagens nos detectores.

11.1- Compare os resultados obtidos nos detectores com a predição apresentada na questão 9, explicando as possíveis semelhanças e diferenças observadas.

11.2- Em relação ao caso em que um polaroide está a 45 graus e o outro a 135 graus, a sua predição é compatível com os resultados obtidos? Há alguma divergência? Explique.

12- Quanto às probabilidades de detecção para as combinações de polaroides utilizadas no contexto experimental da questão 10, como você as compara com as probabilidades de detecção para essas mesmas combinações de polaroides utilizadas na simulação computacional? Explique.

Analisando cada item da questão 10, vemos que a predição correta da probabilidade de detecções simultâneas nos itens 10.1 e 10.2 é $p_{AB} = 1/2$. Se obtém resultado idêntico para quando o par é emaranhado, pois $p_{AB} = (1/2) \cos^2(0) = 1/2$. Assim, como a predição baseada no *layout* modificado equivale ao resultado obtido quando o par é emaranhado, não se espera que essas situações causem inquietação nos estudantes. O item 10.3 tem possibilidade

de causar alguma inquietação, pois quando os dois polaroides são orientados a 45 graus, a probabilidade de detecção simultânea no experimento proposto na Fig. 21 é $p_{AB} = 1/4$, enquanto que para o par de fótons emaranhado temos o mesmo resultado que para os itens 10.1 e 10.2, ou seja, $p_{AB} = 1/2$. No entanto, é comum os estudantes se contentarem apenas em prever se é ou não possível a detecção conjunta, não aprofundando a discussão ao ponto de prever corretamente as probabilidades de detecção conjunta nessas situações. Isso pode fazer com que a grande diferença entre as duas situações físicas não seja percebida (lembrando que não há como executar a simulação no *software* com o *layout* proposto na Fig. 21). O item 10.4 leva também ao mesmo resultado para os dois *layouts*, pois a probabilidade de detecção conjunta é nula em ambas as situações. Quando um polaroide está alinhado a zero graus e o outro a 90, em geral os estudantes percebem que sempre um dos fótons será absorvido por um dos polaroides (ou seja, é impossível ambos serem transmitidos e deflagrarem detecção conjunta), tanto na situação em que o par é emaranhado quanto na situação proposta na Fig. 21. Assim, também a partir dessa situação eles podem não perceber o caráter bastante contraintuitivo do fenômeno no caso em que o par é emaranhado.

É o item 10.5 que tem maior possibilidade de causar um choque maior entre a predição dos estudantes e os resultados apresentados (ver Fig. 22) e é ele que traz à tona o caráter não-intuitivo do fenômeno do emaranhamento.

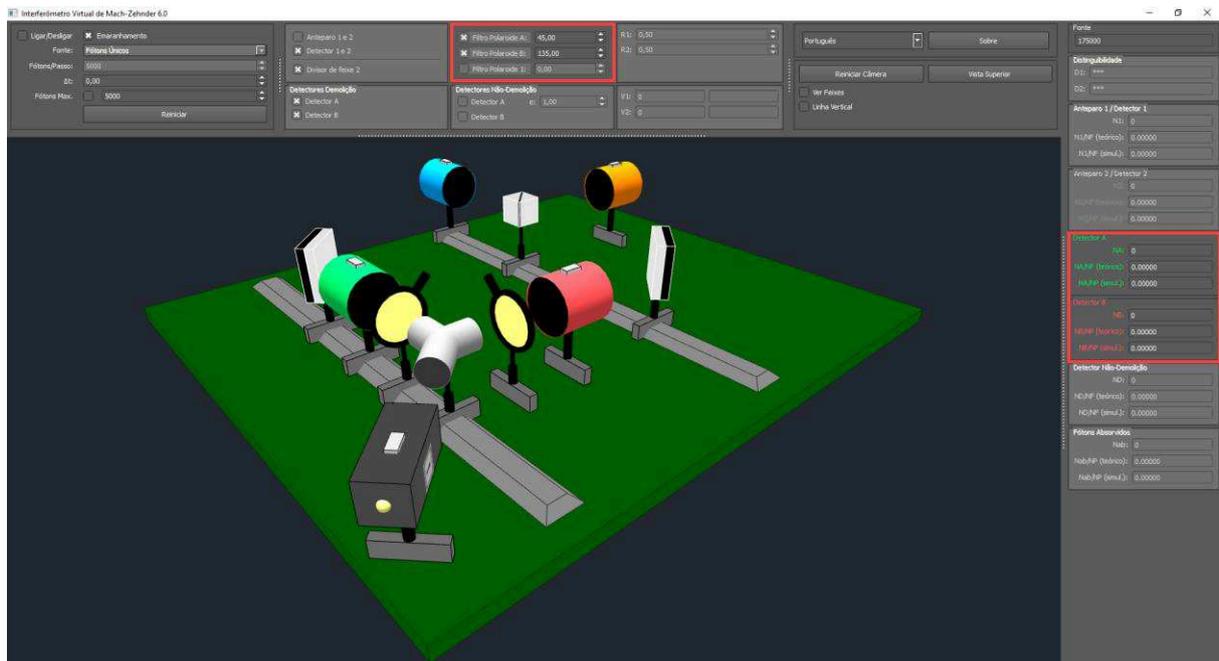


Fig. 22 – Todos os pares de fótons são absorvidos nos polaroides quando o eixo de transmissão de um deles está orientado a 45 graus e do outro a 135 graus.

No *layout* proposto na Fig. 21 fica claro que deverá haver detecções conjuntas, uma vez que estando ambos os fótons do par no estado $|h\rangle$ ou $|v\rangle$, a orientação dos eixos de

transmissão de ambos os polaroides é tal que permite que eventualmente um par seja transmitido e ocorra sua detecção conjunta. De fato, fazendo $\xi_A = 45$ graus e $\xi_B = 135$ graus (ou *vice-versa*) obtém-se $p_{AB} = 1/4 = 0,25$, ou seja, em 25 por cento dos eventos haverá detecção conjunta para esse *layout* modificado.

Para o caso em que o par é emaranhado, a probabilidade de transmissão conjunta é $p_{AB} = (1/2) \cos^2(90^\circ) = 0$, ou seja, se um fóton é transmitido (absorvido) pelo polaroide A o outro é absorvido (transmitido) pelo B¹⁵, jamais ocorrendo transmissão conjunta (fenômeno não-local). Como o estado de ambos os fótons do par sempre é $|h\rangle$ ou $|v\rangle$, ou seja, nunca coincidem com a direção perpendicular ao eixo de transmissão dos dois polaroides, os estudantes geralmente esperam que transmissões conjuntas sejam possíveis também nesse caso. Porém, quando o par é preparado no estado (5) nunca ocorre transmissão conjunta para essas orientações de polaroides e os detectores nunca acusam a presença de fótons (lembrando que nessa versão do *software* só as coincidências são registradas). É nesse ponto que é comum surgir manifestações de desconforto por parte dos estudantes quando trabalham com o *software*. Resultados similares podem ser obtidos para quaisquer orientações de polaroides (considerando primeiro quadrante) tais que $0^\circ < \xi_{A,B} < 90^\circ$ e $|\xi_A - \xi_B| = 90^\circ$.

Assim, a proposição do experimento mental esquematizado na Fig. 21 tem o propósito de fazer com que os alunos pensem em termos de estados classicamente correlacionados e percebam como o emaranhamento é um fenômeno contraintuitivo e que não possui contrapartida clássica. Em um nível mais avançado, pode-se mostrar no caso da questão 10.5 que o estado do par de fótons interage com os polaroides como um objeto quântico único, de forma que o processo é probabilístico. Na interação com os polaroides, *o estado de polarização do par* é projetado (colapsa) para o estado que corresponde à orientação do eixo de transmissão dos polaroides (no caso, 45 ou 135 graus), cada uma dessas duas possibilidades tendo probabilidade 1/2 de ocorrer. Sabendo que *o estado de polarização do par* colapsa para um ou outro desses estados, certamente um dos fótons será transmitido e o outro absorvido, independente para qual dos dois estados o par seja projetado. O par foi nesse caso preparado no estado puro (5), uma superposição coerente, e é o fato do estado *de ambos os fótons* colapsar em conjunto para um mesmo estado de polarização na interação com os polaroides que torna o fenômeno contraintuitivo. Para esse fenômeno ser bem estudado é necessário obter o estado global do par após a interação com os polaroides¹⁶.

Esse tipo de correlação é bastante distinta daquela proposta na Fig. 21. Naquele caso o par não é preparado em um estado puro representado por uma superposição coerente tal como a mostrada em (5), mas em um estado misto. É possível omitir dos estudantes a diferença entre estados puros e mistos e adotar uma explicação mais qualitativa. Isto é adequado,

¹⁵A probabilidade de um fóton do par ser transmitido por um detector e absorvido pelo outro nesse caso é $(1/2) \sin^2(\xi_A - \xi_B) + (1/2) \sin^2(\xi_A - \xi_B) = \sin^2(\xi_A - \xi_B) = \sin^2(90^\circ) = 1$. Assim, na situação proposta só um fóton é transmitido de cada vez, diferente do que ocorre quando se considera o *layout* da Fig. 21.

¹⁶ Pretendemos fazer essa análise mais pormenorizada em um trabalho futuro.

uma vez que operacionalizar matematicamente a representação de estados mistos em sistemas compostos é trabalhoso e complexo, requerendo plena proficiência no formalismo baseado no operador densidade. Nesse caso, embora haja uma correlação nos estados de polarização dos fótons na saída da fonte, essa correlação é inserida por um dispositivo clássico, por hipótese. Tomemos, por exemplo, o fóton emitido pela fonte 1 (fóton 1). Quando ele interage com o polaroide A, seu estado de polarização pode ser projetado para o estado que corresponde à orientação do eixo de transmissão desse polaroide, nesse caso com probabilidade $1/2$. A interação do fóton 2 com o polaroide B é totalmente independente do que ocorre com o fóton 1, podendo este também ser transmitido (também com probabilidade $1/2$). A probabilidade de transmissão conjunta é, portanto, $1/2 \times 1/2 = 1/4$. Assim, esse par de fótons se comporta *de forma independente* quando interage com os polaroides – a interação pode ser analisada em cada evento *individual* de cada um dos fótons com o respectivo polaroide (*o fóton único constitui o objeto quântico*, mesmo que estejam em pares no interferômetro). No caso em que o par é emaranhado, *o par constitui o objeto quântico*.

A simulação computacional e a atividade didática não têm a intenção de oferecer respostas prontas aos estudantes, mas de servirem como ferramentas mediadoras em todo esse processo dinâmico de discussão, de busca e de construção de modelos explicativos. Na simulação do emaranhamento quântico, mais do que nunca, cria-se um cenário que requer a intervenção contínua do professor, sob o risco de que a atividade não atinja seus objetivos, que basicamente é diferenciar o fenômeno em questão daquele proposto na Fig. 21, reconhecendo seu caráter contraintuitivo e que não possui contrapartida clássica.

VI. Considerações finais

A partir da perspectiva da ação mediada por ferramentas culturais, o objetivo geral da simulação computacional no IVMZ, juntamente com as atividades didáticas, é auxiliar os estudantes no processo de compreensão de uma classe de conceitos de FQ e, assim, se tornarem mais fluentes na semiose que constitui os conceitos estudados. No caso da nossa proposta, isso envolve colocar os estudantes frente a situações nas quais os padrões de ação que empregam são conflitantes com aspectos contraintuitivos da FQ ou não conseguem dar conta destes.

A compreensão dos conceitos envolvidos exige mudanças qualitativas nos padrões de ação envolvidos, profundas na maioria das vezes, e a mediação realizada pelo *software* e atividades didáticas procura se constituir como um meio para que isso possa se estabelecer. Essa intencionalidade se reflete na própria maneira pela qual reconhecemos as atividades didáticas. São de natureza exploratória para o professor e para o estudante vivenciarem simulações de fenômenos-chave da FQ em uma interação mediada pelo *software* como ferramenta cultural. Nas nossas pesquisas, já citadas no texto, esse caráter exploratório também se manifestou na forma como os estudantes se comportavam perante o *software*. Muitas vezes, durante as simulações, os estudantes promoviam alterações deliberadas nos dispositivos, seja na

tentativa de confirmar alguma hipótese ou simplesmente antecipando-se às orientações na atividade didática. Para evitar que estes executem a simulação sem efetivamente explorá-la e também para provocá-los a analisar e comparar suas explicações antes e depois da simulação, mas cuidando para não tornar rígidas as atividades, expressões como *mantenha a fonte desligada* ou *agora realize a simulação* são utilizadas em diversos momentos.

Situações como as que discutimos são possíveis quando se criam cenários de ensino-aprendizagem baseados em ferramentas e estratégias que envolvam e desafiem os estudantes e é esse o propósito que se tem com as ferramentas mediadoras que utilizamos. Ao mesmo tempo que se reconhece o papel fundamental das ferramentas mediadoras, é importante reconhecer que a mediação não está nas ferramentas utilizadas, mas no uso que se faz delas. Os meios mediacionais explícitos apresentados aos estudantes são o *software* e as atividades didáticas (roteiros), além da mediação semiótica provida por meio das possíveis intervenções do professor. A mediação implícita, por sua vez, surge a partir das interações entre os estudantes na tentativa de interpretar as contagens nos detectores e os padrões obtidos nos anteparos usando, gradativamente, conceitos próprios da teoria quântica, como distinguibilidade e visibilidade. Questionar os estudantes sobre a natureza do fenômeno envolvido é uma forma de fazê-los começar a pensar sobre a natureza dos objetos quânticos. Aproximando-se da análise realizada por Wertsch (2007), sob a perspectiva da ação mediada, o que se faz ao longo da segunda atividade didática, por exemplo, é introduzir recursos semióticos (padrões de interferência, contagens nos detectores e relação entre distinguibilidade e visibilidade) que anteriormente poderiam ter pouco significado para os estudantes, ou apenas alguma importância funcional na simulação.

Tendo a mediação por ferramentas culturais como pano de fundo, consideramos que estas atividades didáticas podem representar uma importante inovação no ensino da FQ em cursos de formação de professores ou até na formação de físicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro que possibilitou custear o desenvolvimento das novas versões do *software*. O primeiro autor agradece pelo apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul e pela bolsa recebida da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Referências bibliográficas

BAKHTIN, M. M. Os gêneros do discurso. In: ____ (Ed.). **Estética da Criação Verbal**. São Paulo: Martins Fontes, 1997. p. 261-306.

_____. **Marxismo e Filosofia da Linguagem: problemas fundamentais do método sociológico na ciência da linguagem**. 13. ed. São Paulo: Hucitec, 2009. 203 p.

BOHR, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? **Physical Review**, v. 48, n. 8, p. 696-702, oct. 1935. Disponível em: <[http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Bohr%20\(1935\),%20Reply%20to%20EPR.pdf](http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Bohr%20(1935),%20Reply%20to%20EPR.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2017.

_____. **Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995. 129 p.

BROM, J. M.; RIOUX, F. Polarized light and quantum mechanics: an optical analog of the Stern-Gerlach experiment. **The Chemical Educator**, v. 7, n. 4, p. 200-204, aug. 2002. Disponível em: <<http://www.users.csbsju.edu/~frioux/polarize/740200jb.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F.; LIMA, N. W.; NETTO, J. S. Software-aided discussion about classical picture of Mach–Zehnder interferometer. **European Journal of Physics**. Aceito para publicação. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa8754>>. Acesso em: 27 set. 2017.

DEHLINGER, D.; MITCHELL, M. W. Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 9, p. 898-902, aug. 2002a. Disponível em: <<http://www.optics.rochester.edu/workgroups/lukishova/QuantumOpticsLab/homepage/mitchell2.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

_____. Entangled photons, nonlocality, and Bell inequalities in the undergraduate laboratory. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 9, p. 903-910, aug. 2002b. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/quant-ph/0205171>>. Acesso em: 04 jan. 2016.

DIMITROVA, T. L.; WEIS, A. The wave-particle duality of light: a demonstration experiment. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 2, p. 137-142, jan. 2008. Disponível em: <<http://depts.washington.edu/jrphys/ph331/share/mach1.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2014.

DIRAC, P. A. M. **The Principles of Quantum Mechanics**. 4 ed. Oxford: Clarendon Press, 1958. 314 p.

EDAMATSU, K. Entangled photons: generation, observation, and characterization. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 46, n. 11, p. 7175-7187, nov. 2007. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.46.7175/meta>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? **Physical Review**, v. 47, n. 10, p. 777-780, may 1935. Disponível em: <<http://www.drchinese.com/David/EPR.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

ENGLERT, B.-G. Fringe visibility and which-way information: an inequality. **Physical Review Letters**, v. 77, n. 11, p. 2154-2157, sept. 1996. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.77.2154>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

FERRARI, C.; BRAUNECKER, B. Entanglement, which-way measurements, and a quantum erasure. **American Journal of Physics**, v. 78, n. 8, p. 792-795, July 2010. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/0911.2072>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

GALVEZ, E. J. Qubit Quantum Mechanics with correlated-photon experiments. **American Journal of Physics**, v. 78, n. 5, p. 510-519, apr. 2010. Disponível em: <<https://www.colgate.edu/portaldata/imagegallerywww/98c178dc-7e5b-4a04-b0a1-a73abf7f13d5/ImageGallery/qubit-quantum-mechanics.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

GALVEZ, E. J.; HOLBROW, C. H.; PYSHER, M. J.; MARTIN, J. W.; COURTEMANCHE, N.; HEILIG, L.; SPENCER, J. Interference with correlated photons: five Quantum Mechanics experiments for undergraduates. **American Journal of Physics**, v. 73, n. 2, p. 127-140, Jan. 2005. Disponível em: <http://student.ndhu.edu.tw/~d9914102/Teaching/102-2%20OP/paper/102-2%20OP%20Paper%20data/Interference_with_correlated_photons_Five_quantum_mechanics_experiments.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2014.

GOFF, A. Quantum tic-tac-toe: a teaching metaphor for superposition in Quantum Mechanics. **American Journal of Physics**, v. 74, n. 11, p. 962-973, oct. 2006. Disponível em: <<http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2213635?journalCode=ajp>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

GORDON, M.; GORDON, G. Quantum computer games: quantum minesweeper. **Physics Education**, v. 45, n. 4, p. 372-377, July 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/231154416_Quantum_computer_games_Quantum_minesweeper>. Acesso em: 15 mar. 2014.

GRANGIER, P.; ROGER, G.; ASPECT, A. Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences. **Europhysics Letters**, v. 1, n. 4, p. 173-179, feb. 1986. Disponível em: <http://www.lac.u-psud.fr/IMG/pdf/anticorrelation_epl.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2017.

GREENBERGER, D. M.; YASIN, A. Simultaneous wave and particle knowledge in a neutron interferometer. **Physics Letters A**, v. 128, n. 8, p. 391-394, apr. 1988. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375960188901144>>. Acesso em: 04 jan. 2017.

HOLBROW, C. H.; GALVEZ, E.; PARKS, M. E. Photon Quantum Mechanics and beam splitters. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 260-265, mar. 2002. Disponível em: <<http://physics.gu.se/~ostlund/kvant/ajpbs02-2.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2017.

JACOBS, K.; WISEMAN, H. M. An entangled web of crime: Bell's Theorem as a short story. **American Journal of Physics**, v. 73, n. 10, p. 932-937, sept. 2005. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0504192.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

JAEGER, G.; SHIMONY, A.; VAIDMAN, L. Two interferometric complementarities. **Physical Review A**, v. 51, n. 1, p. 54-67, jan. 1995. Disponível em: <<http://math.bu.edu/people/jaeger/praj2.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

KÖBERLE, R. Sobre a gênese da Mecânica Ondulatória. **Revista Brasileira de Física**, v. 9, n. 1, p. 243-274, 1979. Disponível em: <<http://sbfisica.org.br/bjp/download/v09/v09a18.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2016.

KOHNLE, A.; CASSETTARI, D.; EDWARDS, T. J.; FERGUSON, C.; GILLIES, A. D.; HOOLEY, C. A.; KOROLKOVA, N.; LLAMA, J.; SINCLAIR, B. D. A new multimedia resource for teaching quantum mechanics concepts. **American Journal of Physics**, v. 80, n. 2, p. 148-153, jan. 2012. Disponível em: <<http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.3657800?journalCode=ajp>>. Acesso em: 12 out. 2016.

KOHNLE, A.; DOUGLASS, M.; EDWARDS, T. J.; GILLIES, A. D.; HOOLEY, C. A.; SINCLAIR, B. D. Developing and evaluating animations for teaching Quantum Mechanics concepts. **European Journal of Physics**, v. 31, n. 6, p. 1441-1455, sept. 2010. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/31/6/010/meta>>. Acesso em: 12 out. 2016.

KWIAT, P. G. One- and two-photon interference. In: GREENBERGER, D.; HENTSCHEL, K.; WEINERT, F. (Eds.). **Compendium of Quantum Physics**. Heidelberg: Springer, 2009. p. 428-434.

KWIAT, P. G.; WAKS, E.; WHITE, A. G.; APPELBAUM, I.; EBERHARD, P. H. Ultrabright source of polarization-entangled photons. **Physical Review A**, v. 60, n. 2, p. R773-R776, aug. 1999. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b53f/ac92de531377e325e8b82c473f8e08aa5eed.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2016.

MARSHMAN, E.; SINGH, C. Interactive tutorial to improve student understanding of single photon experiments involving a Mach-Zehnder interferometer. **European Journal of Physics**, v. 37, n. 2, p. 024001, feb. 2016. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/37/2/024001>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

_____. Investigating and improving student understanding of quantum mechanics in the context of single photon interference. **Physical Review Physics Education Research**, v. 13, n. 1, p. 010117, apr. 2017. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010117>>. Acesso em: 30 maio 2017.

MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; DUBSON, M.; MALLEY, C.; REID, S.; LEMASTER, R.; WIEMAN, C. E. Developing and researching PhET simulations for teaching Quantum Mechanics. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 4, p. 406-417, mar. 2008. Disponível em: <<http://www.colorado.edu/physics/EducationIssues/papers/QMsims.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2016.

MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 200-209, feb. 2002. Disponível em: <<http://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.1435346>>. Acesso em: 23 nov. 2014.

NETO, J. S.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Apropriação do conceito de emaranhamento quântico por professores em formação. **Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**. n. XV. Maresias, 2014. p. 8. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/278848291_Apropriacao_do_conceito_de_emaranhamento_quantico_por_professores_em_formacao>. Acesso em: 19 fev. 2016.

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. 1401-1-1401-10, jan. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n1/12.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

NETTO, J. S. **Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico na formação de professores de Física segundo a perspectiva sociocultural**. (2015). 311 f. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

NETTO, J. S.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Wave-particle complementarity: teaching quantum physics with a Virtual Mach-Zehnder Interferometer. In: GIREP-MPTL International Conference, University of Palermo. GIREP MPTL 2014. p. 871-878. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320068853_Wave-particle_complementarity_teaching_quantum_physics_with_a_Virtual_Mach-Zehnder_Interferometer>. Acesso em: 19 fev. 2016.

_____. Estratégias discursivas adotadas por professores em formação na compreensão do fenômeno da complementaridade em atividades didáticas mediadas pelo interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 15, n. 2, p. 293-320, maio 2015. Disponível em: <<https://seer.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/2519/1919>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 3, p. 1094-1116, sept. 2009. Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2013.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193-203, abr. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v27n2/a03v27n2.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Desenvolvimento de um software para o ensino de fundamentos de Física Quântica. **Física na Escola**, v. 7, n. 1, p. 22-25, maio 2006. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol7/Num1/v12a07.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

_____. Investigando a aprendizagem de professores de física acerca do fenômeno da interferência quântica. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 1, p. 35-54, jan. 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v14n1/03.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

PEREIRA, A. P. **Fundamentos da Física Quântica na formação de professores: uma análise de interações discursivas em atividades centradas no uso de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder**. (2008). 139 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Recursos e restrições nas explicações de futuros professores de Física sobre Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 12, n. 2, p. 9-28, maio 2012. Disponível em: <<https://seer.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/2432/1832>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H. O ensino de Física Quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores mediado por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 2, p. 376-398, mayo 2009a. Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen8/ART1_Vol8_N2.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2016.

_____. On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. **Physics Education**, v. 44, n. 3, p. 281-291, may 2009b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0031-9120/44/3/008>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

_____. A ocorrência da “fala privada” entre adultos: uma estratégia analítica para o estudo das funções intrapsicológicas no ensino de ciências. **Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 13, n. 1, p. 105-120, jan. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/epec/v13n1/1983-2117-epec-13-01-00105.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

_____. Um exemplo de “distribuição social da mente” em uma aula de Física Quântica. **Ciência & Educação**, v. 18, n. 2, p. 257-270, jun. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v18n2/a02v18n2.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

PEREIRA, A. P.; PESSOA JUNIOR, O.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da Física Quântica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. especial 2, p. 831-863, out. 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/22202>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2005. v. 1. 189 p.

SCHNEIDER, M. B.; LA PUMA, I. A. A simple experiment for discussion of quantum interference and which-way measurement. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 266-271, feb. 2002. Disponível em: <<http://www.optics.rochester.edu/workgroups/lukishova/QuantumOpticsLab/homepage/snyderlapuma.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

SCHRÖDINGER, E. An ondulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. **The Physical Review**, v. 28, n. 6, p. 1049-1070, dec. 1926. Disponível em: <<http://users.df.uba.ar/giribet/f4/schrod.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

SINGH, C. Student understanding of Quantum Mechanics. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 8, p. 885-895, july 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228880759_Student_understanding_of_quantum_mechanics>. Acesso em: 30 dez. 2014.

_____. Interactive learning tutorials on quantum mechanics. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 4, p. 400-405, mar. 2008a. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1603.03108.pdf>>. Acesso em: 30 dez. 2014.

_____. Student understanding of Quantum Mechanics at the beginning of graduate instruction. **American Journal of Physics**, v. 76, n. 3, p. 277-287, feb. 2008b. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1602.06660.pdf>>. Acesso em: 30 dez. 2014.

THORN, J. J.; NEEL, M. S.; DONATO, V. W.; BERGREEN, G. S.; DAVIES, R. E.; BECK, M. Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory. **American Journal of Physics**, v. 72, n. 9, p. 1210-1219, aug. 2004. Disponível em: <http://www.reed.edu/physics/courses/Physics332.s17/pdf/Single_Photons.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2016.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 515 p.

VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente**. 7. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2007. 182 p.

WERTSCH, J. V. The Zone of Proximal Development: some conceptual issues. In: ROGOFF, B.; WERTSCH, J. V. (Eds.). **Children's learning in the "Zone of Proximal**

Development". San Francisco: Jossey-Bass, 1984. chap. 1, p. 7-18. (New Directions for Child Development). v. 23.

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

_____. Mediation. In: DANIELS, H.; COLE, M.; WERTSCH, J. V. (Eds.). **The Cambridge companion to Vygotsky**. New York: Cambridge University Press, 2007. chap. 7. p. 178-192.

WOOTTERS, W. K.; ZUREK, W. H. Complementarity in the double-slit experiment: quantum nonseparability and a quantitative statement of Bohr's principle. **Physical Review D**, v. 19, n. 2, p. 473-484, jan. 1979. Disponível em: <https://elearning.physik.uni-frankfurt.de/data/FB13-PhysikOnline/lm_data/lm_740/res/files/file_1855/wootters-zurek.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2014.