

# USO DO INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER EM SEQUÊNCIA DE ENSINO INVESTIGATIVA PARA ANÁLISE DA DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

USE OF MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER IN INVESTIGATIVE  
TEACHING SEQUENCE FOR ANALYSIS OF WAVE-PARTICLE DUALITY

EDUARDO SIMÕES \*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Tocantins (UFT, BRASIL)

---

## Resumo

*O objetivo do presente artigo é o de propor um ambiente experimental envolvendo o uso do Interferômetro Mach-Zehnder (físico e virtual) para a análise da dualidade onda-partícula, sob viés de algumas interpretações da Mecânica Quântica. Para isso, aplicou-se uma metodologia de ensino baseada em uma Sequência de Ensino Investigativa (SEI) junto a alunos do Ensino Médio de um Instituto Federal público brasileiro. O elemento motivador dessa ação foi o de averiguar se o chamamento da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para que a área de Ciências da Natureza contribua com a construção de uma base de conhecimentos contextualizada (Brasil, 2018, p. 537), quando respondido, realmente promove resultados positivos no processo de ensino e aprendizagem. Os resultados da aplicação da SEI demonstraram favoráveis à perspectiva de que a prática e os exemplos concretos são, de fato, protagonistas da aprendizagem propiciando o conhecimento, o envolvimento e o interesse dos alunos. Sendo assim, espera-se que o que é trazido ao público neste artigo seja de proveito e inspiração para outras práticas benfazejas no âmbito do ensino de Física.*

**Palavras-chave:** Sequência de Ensino Investigativa. Interferômetro Mach-Zehnder. Dualidade onda-partícula. Interpretações da Mecânica Quântica.

---

\*[eduardosimões@uft.edu.br](mailto:eduardosimões@uft.edu.br)

---

### Abstract

*The objective of this article is to propose an experimental environment involving the use of the Mach-Zehnder Interferometer (physical and virtual) for the analysis of wave-particle duality, under the bias of some interpretations of Quantum Mechanics. To this end, a teaching methodology based on an Investigative Teaching Sequence (ITS) was applied to high school students at a Brazilian public Federal Institute. The motivating element for this action was to determine whether the call from the National Common Curricular Base (NCCB) for the area of Natural Sciences to contribute to the construction of a contextualized knowledge base (Brazil, 2018, p. 537), when answered, it really promotes positive results in the teaching and learning process. The results of the application of the SEI were favorable to the perspective that practice and concrete examples are, in fact, protagonists of learning, providing students with knowledge, involvement and interest. Therefore, it is hoped that what is brought to the public in this article will be of benefit and inspiration for other beneficial practices within the scope of Physics teaching.*

**Keywords:** *Investigative Teaching Sequence. Mach-Zehnder Interferometer. Wave-particle duality. Interpretations of Quantum Mechanics.*

---

## I. INTRODUÇÃO

O presente artigo serve-se de apresentação dos resultados da aplicação de uma Sequência de Ensino Investigativo (SEI) no âmbito do Ensino Médio de um Instituto Federal Brasileiro, subsidiada pelo uso do Interferômetro Mach-Zehnder tanto físico, quanto virtual. O projeto aplicado distinguiu-se por buscar atender uma demanda levantada pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias.

Interessante notar que, já nos antigos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), de 1998, havia uma queixa de que a oferta da disciplina de Física no Ensino Médio era pautada na abstração, na aplicação do cálculo desconexo de qualquer contextualização e de uma obrigatoriedade de compreensão teórica distanciada do dia a dia do aluno. Dessa forma, segundo aquele documento, era necessário se pensar em uma forma de ensinar Física que fugisse desses parâmetros convencionais. Para isso, dizia-se ser imperativo que o ensino de Física oferecido para os estudantes de Ensino Médio partisse da prática e de exemplos concretos (Brasil, 1998, p. 22).

O excesso de formalismos, o acúmulo de informações descontextualizadas e o foco excessivo na abstração têm tornado, de maneira geral, o ensino de Física monótono e pouco interessante, segundo Capecchi e Carvalho (2006). A literatura especializada, bem como a própria legislação, está ciente de que o problema está na forma como se ensina a Física. Historicamente, esse modelo de ensino tem se concentrado em um conjunto de equações, o que, muitas vezes, não desperta o interesse dos estudantes. Acredita-se, no entanto, que uma mudança nos rumos do ensino dessa área, ao incorporar uma abordagem que apresente e descreva os fenômenos de forma contextualizada, resultará em uma verdadeira revolução na aprendizagem (Carvalho, 2017).

Em termos gerais, o conteúdo de Física é interessante. Trata-se de um campo em que os problemas estão genuinamente ligados ao dia a dia das pessoas, pois o que ela faz é explicar os fenômenos naturais corriqueiros vivenciados por todos. O problema é que quando se busca entender tais fenômenos, a partir de livros-textos ou das aulas de Física, o que se encontram são equações. O físico, muitas vezes, encontra dificuldades em oferecer respostas sem recorrer predominantemente à axiomatização matemática, o que pode contribuir para a percepção de que a disciplina é pouco interessante. E qual seria a saída para a resolução de tal problema? Sem procurar respostas extraordinárias, acredita-se que a solução seja um tanto simples: basta tornar o ensino de Física acessível à realidade do aluno! E o que isso significa? Em outras palavras, faz-se necessário que haja demonstração, prática, exemplificação, ilustração, experimentação. Tratam-se de operacionalizações cuja aplicação viabilizaria o entendimento que tanto se procura em Física (Carvalho e Sasseron, 2015). E isso não implica no abandono da matemática, pois é ela que assegura que as conexões com os fenômenos sejam feitas de forma objetiva, e não por meio de idiosincrasias. A matemática fornece a linguagem precisa e as ferramentas necessárias para modelar, descrever e analisar os fenômenos naturais de maneira científica e não pode ser negligenciada no ensino de Física. Sugere-se, com este artigo, um olhar além da aplicação de uma matemática descontextualizada, com o objetivo de tornar o ensino de Física mais envolvente e de fácil compreensão para os estudantes, promovendo, assim, uma aprendizagem significativa e interessante.

Foi na esteira deste propósito operacionalizar a prática que a presente SEI se encaminhou e se justificou. Pretendeu-se com ela apresentar a prática do ensino de Física como algo atraente, envolvendo sim algumas noções matemáticas, mas sem que a matemática fosse a protagonista do processo. Antes disso, intentou-se que fosse a prática, guiada pela condução teórica, pela explicação do fenômeno, a orientadora do processo de ensino e aprendizagem, e que os resultados práticos obtidos, em termos de conhecimento, fossem emanados dos próprios estudantes, que eram o foco principal da SEI (Ausubel, 1976). Para isso, eles deveriam fazer parte do protagonismo que um trabalho experimental exige, pois foram convidados, após instrumentalização teórica, a manusearem um interferômetro, nesse caso, o Interferômetro Mach-Zehnder (IMZ), físico e virtual, a fim de entenderem como é que a Teoria Quântica, em suas várias interpretações, analisa e entende um fenômeno como o da pressuposta dualidade onda-partícula.

O objetivo principal da SEI era o da proposição de um ambiente, diferente daquele das aulas convencionais, no qual o estudante pudesse passar de objeto a sujeito da própria construção do conhecimento. Para tal, os alunos foram introduzidos no contexto da descoberta, após averiguar o processo de montagem de um experimento, sua execução e sua interpretação. Dessa forma, o professor proponente da SEI passou a ser o mediador, aquele que propiciou um ambiente adequado para que a inserção do estudante na proposta de trabalho pudesse se dar sem traumas e medos. Isso tudo foi feito depois que houve a instrumentalização teórica e a prática de experimental. Somente após estes momentos, os alunos puderam ser submetidos à fase em que se avaliou o processo de aprendizagem.

Enfim, o que se pretendeu com a SEI foi o ensino de Física Teórica associada à prática experimental, onde problemas como aqueles da medição em Mecânica Quântica (MQ), pudessem ser apresentados de forma visual e conceitual, sem que a matemática fosse

a protagonista do processo. A expectativa inicial, que se concretizou, era a de que os estudantes, nesse caso, aqueles do 3º ano do Ensino Médio, do curso técnico em Eletrotécnica, pudessem se animar ante a uma proposta que os tirassem um pouco do ambiente estrito de sala de aula e os introduzissem no interessante mundo das visualizações experimentais dos ambientes laboratoriais

## II. O INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER (IMZ)

O IMZ foi desenvolvido, em 1892, independentemente pelo alemão Ludwig Zehnder e pelo austríaco Ludwig Mach, filho do físico e filósofo austríaco Ernst Mach. Trata-se de um equipamento para experimentos em Óptica que serve para determinar as diferenças de fase relativas a dois raios de luz devido a variações do caminho óptico percorrido por eles. Esse equipamento também nos permite fazer boas aproximações com eventos quânticos desde que se reduza exponencialmente a intensidade da luz, especialmente, com aqueles que dizem respeito à dualidade onda-partícula. O equipamento proposto para fins didáticos de atividade prática em Física, em sua constituição básica, é composto por uma fonte de luz, dois espelhos 100% refletivos (E1 e E2), dois espelhos semirrefletivos (S1 e S2) e anteparos<sup>1</sup>, tal como ilustrado na Figura 1:

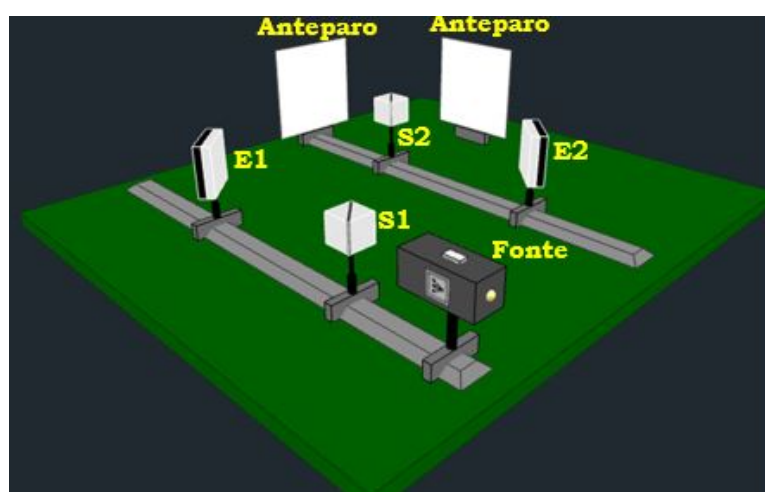
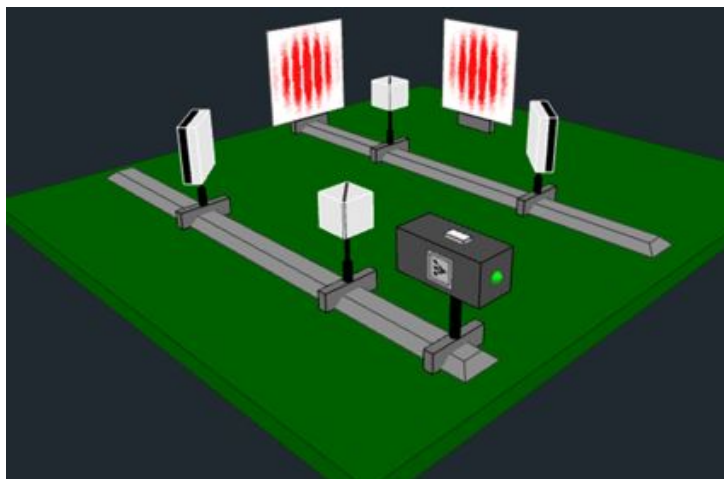


Figura 1: Estrutura básica IMZ. Fonte: Ostermann (2017)

Da mesma forma que o experimento de dupla fenda, o IMZ também reproduz os padrões de interferência. Nesse caso, é possível verificar a formação de padrões, visto do aparecimento das franjas no anteparo, que são resultado de ondas que se interferem. Veja como isso acontece ao se utilizar um Interferômetro Virtual Mach-Zehnder:

<sup>1</sup>A estrutura e organização dos componentes do IMZ se manterá para as demais figuras que lhe fazem alusão.

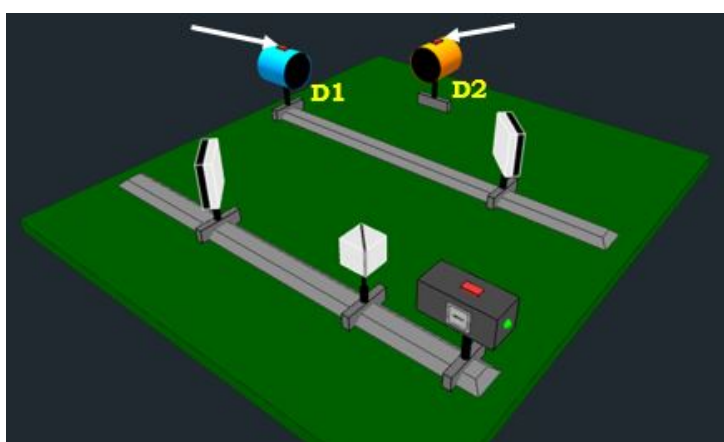


**Figura 2:** Padrão de interferência no IMZ. Fonte: Ostermann (2017)

O IMZ virtual, diferentemente do físico, simula a dualidade onda-partícula na escala quântica. Para que isso ocorra, contudo:

É preciso diminuir a intensidade do feixe até que apenas poucos fótons incidam em S1 por vez. Além disso, é preciso utilizar detectores sensíveis à presença de um único fóton, como é o caso de uma fotomultiplicadora, que possui uma eficiência de 30% (ou seja, cerca de um terço dos fótons que nela incidem geram um sinal amplificado). (Pessoa Jr. 1997, p. 32)

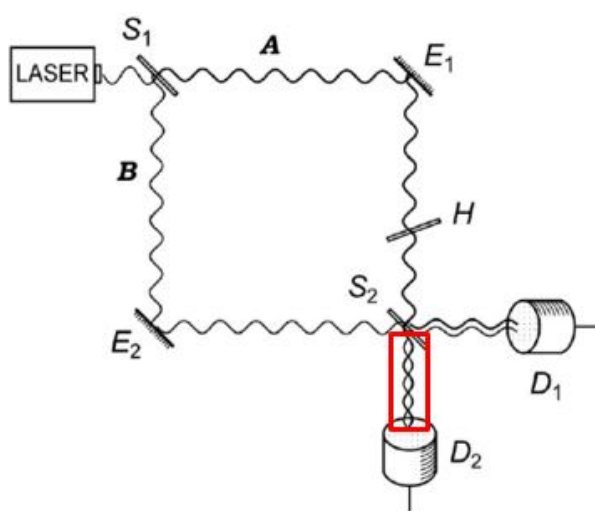
Sendo assim, no desenvolvimento do experimento, os anteparos foram substituídos por detectores (D1 e D2) e a intensidade do feixe de luz foi reduzida. Tem-se aqui uma fonte de onde se emitem fótons individuais (regime monofotônico) que passam por um espelho semirrefletor e se dividem em dois caminhos. Esses fótons são posteriormente medidos pelos detectores D1 e D2.



**Figura 3:** Ativação de ambos detectores com uso de somente um espelho semirrefletor S1. Fonte: Ostermann (2017)

Para um dado fóton, D1 e D2 têm ambos 50% de chance de serem ativados (cliquem). Se se envia um grande número de fótons, então, aproximadamente metade das vezes ter-se-á um clique em D1 e metade das vezes teremos um clique em D2, conforme ilustra a Figura 3, onde se vê acionados os simultaneamente os botões vermelhos de D1 e D2.

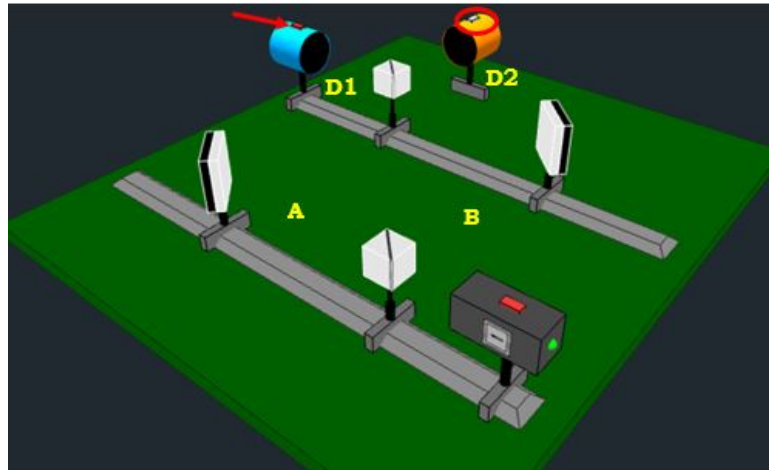
Quando se acrescenta o espelho semirrefletor S2, os fótons passam pelo semirrefletor S1, que os divide transmitindo-os pelos caminhos A (50%) e B (50%). Cada componente reflete, então nos espelhos E1 e E2 e voltam a se cruzar no espelho semirrefletor S2, encaminhando para os detectores D1 e D2. E o que acontece, nesse caso, já que existem dois espelhos semirrefletores que têm o potencial de refletir 50% do feixe de luz antes e depois de E1 e E2? Ter-se-ia o registro dos fótons em D1 e D2? Curiosamente, a resposta é não.



**Figura 4:** S1 reflete o feixe para os caminhos A e B. Fonte: Pessoa Jr. (2019, p. 10 - adaptada)

Como cada componente se divide em duas partes em S2, poderíamos esperar que cada detector mediria 50% do feixe. Mas não é isso que acontece! Observa-se, quando as distâncias percorridas pelos dois componentes forem exatamente iguais e o alinhamento dos espelhos for perfeito, que 100% do feixe original incide em D1, e 0% em D2! (Pessoa Jr., 2019, p. 10)

Por que isso ocorre? Isso acontece em virtude da superposição construtiva em D1 e da superposição destrutiva em D2. Quando se coloca o segundo espelho semirrefletor, poder-se-ia esperar que os dois detectores continuassem clicando o mesmo número médio de vezes, afinal um espelho semirrefletor divide os fótons igualmente nas duas direções. Contudo, a incidência sobre um dos detectores é suprimida pelo efeito de interferência destrutiva: o componente que veio de A cancela o componente que veio de B.



**Figura 5:** Interferência destrutiva em D2. Fonte: Ostermann (2017)

Agora, o que aconteceria se bloqueasse o componente que vai por B, e só deixasse livre o componente A? Nesse caso, 50% da luz resultante cairia em D2. Isso é muito estranho, pois se desbloquear B e voltar à situação inicial de soma de fótons de A e B, 0% chega em D2, ou seja, nessa situação, se se tentar bloquear os fótons em B, acaba passando mais fótons em D2 deixando de existir interferência. A explicação teórica para esse fato é que:

O feixe A se aproxima de S2 com uma amplitude  $\Psi_0/\sqrt{2}$  e com um avanço relativo de  $\lambda/2$  (devido a uma reflexão total em E1); o feixe B se aproxima com mesma amplitude e um avanço de  $3\lambda/4$ , pois sofreu reflexões em S1 e E2. No espelho semirrefletor S2, metade do feixe A é transmitida e metade é refletida, sendo que a mesma coisa ocorre para o feixe B. Consideremos as partes de A e de B que rumam para D2. O componente que percorreu o caminho A passa direto sem reflexão, permanecendo com avanço relativo de  $\lambda/2$ , e passando a ter uma amplitude  $\Psi_0/2$  após a divisão da onda; enquanto isso, o componente vindo de B sofre uma reflexão adicional (em S2), ficando deslocado em  $\lambda$  (equivalente à defasagem nula), com amplitude  $\Psi_0/2$ . Temos assim uma diferença de  $\lambda/2$  entre os componentes de mesma amplitude, o que corresponde a uma superposição destrutiva. Ou seja, as amplitudes que atingiriam D2 se anulam, e nada é detectado neste potenciômetro. (Pessoa Jr., 2023, p. 10)

O que se vê acontecer na experiência de manter ou retirar o espelho semir-refletor S2? O que se observa é a manifestação de duas situações complementares, na linguagem de Niels Bohr, mas mutuamente excludentes. No primeiro momento, aquele da inclusão dos dois espelhos semirrefletores (S1 e S2), vê-se um padrão de interferência destrutiva em D2 e construtiva em D1 (ativação de D1) o que evidenciou se tratar de um fenômeno ondulatório. No segundo momento, aquele da subtração de S2, confirmou ser um fenômeno corpuscular, pois com a retirada do presente semirrefletor, saber-se-á que a luz poderá cair tanto em D1 quanto em D2. Se, na Figura 4, o fóton foi detectado em D1, isso significa que trilhou o caminho B. Nesse caso, como se pode inferir trajetórias passadas, segundo Bohr (1928),

pode-se associar a este fenômeno um “quadro conceitual da física clássica de partículas”, isto é, o fenômeno é corpuscular.

O que se verá no desenvolvimento desse tipo de experimento é que, de acordo com o princípio de complementaridade, só se pode dizer que um objeto quântico se configura como onda ou partícula no fecho do procedimento experimental. Essa atitude é instrumentalista, visto que coloca no instrumento de medição toda a responsabilidade pela definição do fenômeno. E, ao mesmo tempo que é instrumentalista, é também positivista, pois, para a complementaridade, não é possível se falar absolutamente nada do objeto quântico a não ser que seja por meio do experimento. Trata-se de uma atitude antirrealista que, ao fim e ao cabo, deposita no sujeito (que manipula o aparato experimental) toda a responsabilidade pelo deciframento da realidade quântica. Mas, e como outras interpretações analisam os resultados supramencionados?

O fecho do desenvolvimento da presente SEI demonstrou para os alunos do 3º ano do Ensino Médio como se dá a análise da dualidade onda-partícula sob o viés de algumas interpretações da Mecânica Quântica.

### III. METODOLOGIA

A proposta metodológica do presente artigo pautou-se numa SEI, fundamentada em Carvalho (2017). Em seu texto O Ensino de Ciências e a Proposição de Sequências de Ensino Investigativas a autora supramencionada propõe uma sequência didática perfeitamente adaptável a uma proposta de atividade prática. Trata-se de um modelo metodológico de simples aplicação que se orienta sob quatro vieses: a) enunciação de um problema; b) aplicação de atividade de sistematização; c) contextualização do conhecimento no dia-a-dia dos alunos; d) avaliação (2017).

Quanto à **enunciação do problema**, Carvalho (2017) sugere três caminhos possíveis que são: “problema experimental”, as demonstrações investigativas e os “problemas não experimentais”. Para fins de adequação à presente proposta, aplicada para uma turma do 3º ano do Ensino Médio matutino do curso profissionalizante de Eletrotécnica de um Instituto Federal brasileiro, optou-se pelo primeiro caminho, aquele da enunciação de um problema de cunho experimental. Para tal, fez-se junto à turma uma contextualização e descrição do problema, apresentado sob forma de pergunta norteadora (2017).

Segundo Carvalho (2017, p. 8):

O problema não pode ser uma questão qualquer. Deve ser muito bem planejado para ter todas as características apontadas pelos referenciais teóricos: deve estar dentro de cultura social dos alunos, isto é, não ser alguma coisa que os espantem, sendo interessante para eles de tal modo que eles se envolvam na procura de uma solução e a busca desta solução deve permitir que os mesmos exponham os conhecimentos anteriormente adquiridos (espontâneos ou já estruturados) sobre o assunto. É a partir desses conhecimentos anteriores e da manipulação do material escolhido que os alunos irão levantar suas hipóteses e testá-las com a finalidade de resolver o problema.

A hipótese principal que se pretendeu que os alunos a antecipassem, foi a de que, ao ajustar cuidadosamente os parâmetros do IMZ e utilizando fótons como partículas de teste, pudéssemos observar e medir tanto o comportamento de interferência de ondas, quanto o comportamento de partículas em situações específicas.

Para o gerenciamento da classe, Carvalho (2017, p. 8-9) sugere que alguns passos sejam seguidos que foi respeitado no trabalho com a turma, a saber:

- 1) Etapa de distribuição do material experimental e proposição do problema pelo professor;
- 2) Etapa de resolução do problema pelos alunos;
- 3) Etapa da sistematização dos conhecimentos elaborados nos grupos;
- 4) Etapa de escrever e desenhar.

A fase subsequente é a da **leitura de texto e sistematização do conhecimento**. “Um texto de sistematização então se torna muito necessário, não somente para repassar todo o processo da resolução do problema como também o produto do conhecimento discutido em aulas anteriores, isto é, os principais conceitos e ideias surgidas” (Carvalho, 2017, p. 11). Segundo a autora, esse é o momento da passagem do informal para o formal. Dessa forma, foi sugerido para orientação da sistematização do conhecimento o texto “Interferômetro de Mach-Zehnder” de autoria de Osvaldo Pessoa Jr (2023).

A penúltima fase metodológica da SEI proposta foi a da **contextualização social do conhecimento e/ou aprofundamento do conteúdo**. Segundo Carvalho (2017), a contextualização pode se dar desde questões mais simples que envolvem o dia a dia, a exemplo de, “no seu dia-a-dia aonde vocês podem ver esse fenômeno?” até questões mais complexas do tipo “o que há de semelhante entre o que você viu e aprendeu resolvendo o problema proposto e sua atual percepção de como se comporta um objeto quântico, um fóton, por exemplo?”. “O importante é que essas atividades sejam aplicações interessantes do conteúdo que está sendo desenvolvido ou mesmo um aprofundamento onde serão introduzidos novos conceitos correlatos que serão importantes para o desenvolvimento de novas SEIs” (Carvalho, 2017, p. 12).

Por fim, a última etapa da presente SEI foi a da **avaliação e/ou aplicação finalizando a SEI**. A avaliação proposta não teve o caráter somativo ou classificatório e sim um caráter formativo sendo um “instrumento de aprendizado de ações, atitudes e valores próprios da cultura científica” (Carvalho, 2017, p. 13), que valorizou também os conteúdos processuais e atitudinais.

Os conteúdos processuais e atitudinais não são tão comuns de serem avaliados na escola, mas nas SEIs essas avaliações se tornam importantes, pois eles fazem parte integrante do ensino de Ciências como investigação e precisam ser ressaltados pelos professores para os alunos. Vamos dar exemplos de comportamentos de alunos que indicam que estão aprendendo o processo da construção do conhecimento científico e tendo atitudes compatíveis com esse processo. (Carvalho, 2027, p. 14)

Para tal, ao final da SEI, organizou-se um questionário sobre os pontos importantes que foram desenvolvidos durante a experiência. Uma avaliação assim pensada e que tenha, antes de tudo um caráter formativo, “realizada no decorrer do ensino de uma SEI, tem a finalidade também de criar oportunidades para uma autoavaliação por parte dos alunos, cabendo ao professor orientá-los no reconhecimento de seus avanços e nas conquistas que ainda precisam ser alcançadas” (Carvalho, 2017, p. 14).

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A SEI implementada, conforme se disse, baseou-se na proposta metodológica de Carvalho (2017) que sugere uma aplicação que se orienta sob quatro vieses: a) enunciação de um problema; b) aplicação de atividade de sistematização; c) contextualização do conhecimento no dia a dia dos alunos; d) avaliação. Todos os passos assinalados na literatura supra-mencionada foram devidamente aplicados e o que se segue são os resultados da presente intervenção.

### IV.1. Da enunciação do problema

Depois de algumas semanas de acompanhamento do trabalho docente da professora titular da cadeira de Física do referido Instituto Federal, na turma do 3º ano do Ensino Médio do curso de Eletrotécnica<sup>2</sup>, antes mesmo da implementação do projeto de intervenção, conforme orientação de Carvalho (2017), foi enunciado à turma um “problema motivador”. Tratou-se de uma situação contextualizada em que, após uma descrição do que se pretendia, apresentou aos alunos duas perguntas norteadoras da intervenção subsequente, conforme se segue:

1) Assista ao vídeo experimento da Dupla Fenda, disponível **aqui** e, em grupos de 4 (quatro) educandos, resolva o problema abaixo dissertando sobre as questões propostas:

*Imagine que você está conduzindo um experimento usando um interferômetro (um dispositivo que extrai informações de interferências, neste caso, interferências de ondas sobrepostas) para estudar o comportamento de partículas subatômicas, como fótons, que exibem comportamento dual, ou seja, tanto de partícula quanto de onda. Durante o experimento, você observa um padrão de interferência clássico, indicando comportamento de onda. No entanto, quando você tenta medir a trajetória individual das partículas, você encontra resultados que sugerem comportamento de partícula. Como você explicaria essa aparente contradição no interferômetro? E qual é a relevância desse fenômeno para nossa compreensão da dualidade onda-partícula?*

Vale ressaltar, contudo, que a escolha do vídeo foi pautada pelo seu caráter lúdico e pela linguagem acessível, compatível com o nível de formação da atividade de intervenção, além de sintetizar de forma clara os resultados obtidos com o uso do interferômetro em atividade experimental. Em nenhum momento, o vídeo foi utilizado para sustentar qualquer ideia relacionada a qualquer “misticismo quântico” proveniente da versão original da qual o vídeo é um recorte. Por outro lado, afirmações sobre o status privilegiado do sujeito

<sup>2</sup>A turma é composta de 12 alunos, matriculados e frequentes, que estudam no período matutino.

cognoscente no contexto da MQ, feitas no vídeo, não devem causar estranhamento àqueles que conhecem a história dessa área. Desde sua fundação, os físicos que compuseram a chamada interpretação de Copenhague (como Werner Heisenberg, Niels Bohr, Max Born, Pascual Jordan, entre outros) defenderam um antirrealismo, segundo o qual não existe uma realidade quântica independente do ato de medição. Ou seja, a definição da natureza de um objeto quântico está intrinsecamente ligada à atuação do sujeito cognoscente. Como dizia Heisenberg (1995, p. 44), “isso é realmente um resultado muito estranho, visto que parece indicar que a observação experimental tem um papel decisivo no acontecimento e que a realidade varia, dependendo se a observamos ou não”.

Naturalmente, em todos os campos da experiência, devemos manter uma clara distinção entre o observador e o conteúdo das observações, mas devemos reconhecer que a descoberta do quantum de ação lançou uma nova luz sobre os próprios fundamentos da descrição da natureza, revelando pressupostos até então despercebidos no uso racional dos conceitos em que se baseia a comunicação da experiência. (Bohr, 1995, p.114)

Enfim, atendendo a orientação de Carvalho (2017), o encaminhamento aos alunos foi o de que, a respeito da situação posta, eles deveriam discutir em grupo e apresentar na aula posterior posicionamentos que fossem consensuais da discussão. A devolutiva da problematização proposta tornou-se parte da aplicação de atividade de sistematização, acrescida de uma questão que solicitava aos alunos: “sintetizem os conhecimentos que vocês obtiveram a partir da resolução do problema proposto na semana passada”. Interessante notar é que, mesmo sem o contato teórico prévio com o tema, as respostas ao problema, bem como a solicitação da síntese do conhecimento, apresentaram apontamentos que, como se verá, estão de acordo com algumas interpretações da MQ, mesmo sem a ciência dos próprios estudantes.

## IV.2. Da aplicação de atividade de sistematização

Conforme se disse, a atividade de sistematização constituiu das duas perguntas ao grupo, relacionadas ao problema, bem como da solicitação de síntese individual do conhecimento adquirido. Reitera-se o impacto causado pela análise das respostas ao problema quando da certificação de que, mesmo sem o conhecimento prévio do conteúdo em epígrafe, as respostas dos alunos acabaram por antecipar algumas interpretações consagradas da MQ.

Para a questão do problema que pedia posicionamento sobre “como você explicaria essa aparente contradição entre o comportamento de onda e partícula das partículas subatômicas observadas no interferômetro?”, obteve-se as seguintes respostas:

**Grupo A:** “Ao assistir o vídeo, o primeiro pensamento que se tem a respeito das interferências observadas, é que algo na máquina que foi colocada para observar o comportamento das partículas é que está interferindo e fazendo com que há (sic) essa diferença de comportamento ao ser observada [...]”.

**Grupo B:** *“A aparente contradição entre o comportamento de onda e partículas subatômicas em um interferômetro pode ser relacionado ao princípio da incerteza de Heisenberg”*

Interessante observar que a constatação do **Grupo A** está em pleno acordo com a interpretação de complementaridade de Niels Bohr, segundo a qual, “o objeto só passaria a ter um valor bem definido de posição (ou outro estado observável) após ele ter interagido com o aparelho de medição e o resultado  $x$  ter sido obtido” (Pessoa Jr. 2019, p. 54 grifos nossos). Nesse caso, há uma posição resoluta de que a manifestação do padrão de onda ou partícula deve-se à interação entre o instrumento de medição, o objeto quântico e do observador. É da interação entre o objeto quântico com o aparelho de medição, calibrado conforme pretensões do observador, que o padrão onda ou partícula há de se manifestar. Essa posição é conhecida por instrumentalismo que, na acepção de alguns intérpretes do pensamento de Bohr (Pessoa Jr. 2019, por exemplo), também pode ser tomada por uma espécie de positivismo.

Da mesma forma, a asserção do **Grupo B** está de pleno acordo com aquele conjunto de noções a respeito do comportamento dos objetos quânticos, denominadas de interpretação de Copenhague, da qual Heisenberg era parte. Como se sabe, a mecânica matricial de Heisenberg pode ser usada para descrever o comportamento quântico dos elétrons como ondas que interferem consigo mesmas, enquanto seu princípio da incerteza limita a precisão com que a posição e o *momentum* dos elétrons podem ser medidos. Tal princípio estabelece que a posição e o *momentum* de um elétron não podem ser medidos simultaneamente com precisão arbitrária. Isso significa que, se uma é medida com alta precisão, a outra será imprecisa, e vice-versa. No caso do experimento de dupla fenda, a incerteza na posição e no *momentum* dos elétrons contribui para a formação do padrão de interferência na tela de detecção, pois a incerteza faz com que ambos sejam distribuídos de maneira difusa no espaço, permitindo a interferência quântica (Ling et al, 2021).

Sobre a segunda parte do problema que indagava sobre “qual é a relevância desse fenômeno para nossa compreensão da dualidade onda-partícula?”, conforme apresentado no vídeo, a resposta do **Grupo C** asseverou que: *“Essa dualidade é importante porque mostra que, em escalas muito pequenas, as coisas não se encaixam em nossas ideias clássicas de partículas e ondas. Isso tem implicações práticas na tecnologia, como lasers e microscópios avançados, e é uma área emocionante da física quântica que continua a nos surpreender. Isso é importante porque nos mostra que, nas coisas muito pequenas, não podemos ter certeza se algo é uma onda ou uma partícula. Elas são um pouco como mágicos que mudam o truque quando a plateia está observando. Isso é chamado de dualidade onda-partícula. Portanto, o mundo subatômico é cheio de mistérios e aventuras para os cientistas explorarem. É como segredo emocionante em um mundo mágico de partículas, e os cientistas estão sempre tentando desvendá-lo”*.

Impressionante é notar que com um vídeo motivador, lúdico, mas permeado de informações científicas, consegue-se antes mesmo de uma aula teórica estimular nos alunos a curiosidade sobre o tema, despertando-os para a busca da solução de um problema para o qual pesquisa e conhecimento são necessários na apresentação das respostas. Mais impressionante ainda é o fato de que, na apresentação da solução, esses mesmos alunos anteciparam respostas que foram dadas em interpretações específicas da MQ as quais eles teriam acesso somente com a aula expositiva de apresentação teórica do tema.

Por fim, sobre a síntese individual do conhecimento obtido com a resolução do problema proposto, destaca-se algumas respostas:

a) *“Descobri que o ramo quântico é feito de probabilidades e incertezas, não temos certeza se é onda ou partícula. Não sabemos porque o experimento com o interferômetro, ao ser observado ele muda o seu resultado”;*

b) *“Obtive um melhor entendimento em relação a alguns conceitos sobre física quântica, alguns que apesar de serem conhecidos e parecerem simples, possuem uma análise mais complexa”;*

c) *“Quando os átomos passam por uma fenda, ele pode se comportar da mesma forma em que as ondas se comportaram ao passar por duas fendas, fazendo com que tenha uma formação de duas franjas. Tem a explicação de que os átomos formaram mais de duas franjas, porque ao passar pelas fendas acabaram se duplicando, fazendo assim a formação de mais de duas franjas”;*

d) *“Obtive o conhecimento que tanto onda quanto a partícula podem ser a mesma. Elas podem se somar também”.*

Como se viu pelas respostas ao problema, bem como pela solicitação de síntese, é que conceitos sobre os quais os alunos ainda não tiveram o acesso teórico já foram antecipados nas respostas dos alunos. A interpretação de complementaridade, o princípio da incerteza, o problema da medição em MQ, o fato de a MQ ser probabilística e a interpretação ondulatória foram abordadas num momento no qual não se esperaria tamanha desenvoltura. E isso é, de partida, bastante estimulante!

### IV.3. Da contextualização do conhecimento no dia a dia dos alunos

Seguindo os passos recomendados por Carvalho (2017), a primeira etapa da SEI consistiu da *distribuição do material experimental e proposição do problema pelo professor*, seguida da *etapa de resolução* do problema pelos alunos e da etapa de escrever. Na sequência das etapas, aplicou-se a atividade de *sistematização do conhecimento* e, depois, deu-se a *contextualização do conhecimento* por meio da presente proposta. Este foi o momento de os alunos apresentarem oralmente as respostas às questões levantadas, socializando os conhecimentos adquiridos com o vídeo motivador a partir das discussões que tiveram no interior dos grupos, bem como entregando a atividade de sistematização do conhecimento advindo do problema. Interessante notar que, passadas duas semanas desde o último encontro, ainda assim, os alunos estavam harmonizados com o tema e estimulados a conversar sobre o assunto antes da aula teórica acontecer.

Terminado o momento de sistematização do conhecimento advindo da resolução do problema, aconteceu a aula teórica que se deu na seguinte sequência: aula expositiva geral sobre “O que é Física Quântica?”, “Qual é a essência da Física Quântica?”, “O experimento da dupla fenda”, “Entendendo o problema interferência de ondas na Física Clássica: a descoberta de Thomas Young”, “O que é revelado do padrão de interferência em escala quântica?”, “O interferômetro Mach-Zehnder e o paradoxo gerado para a MQ” e, por fim, “Interpretações da MQ para o fenômeno da dualidade onda-partícula”.



**Figura 6:** Aula expositiva sobre o interferômetro Mach-Zehnder e a dualidade onda-partícula. Fonte: Autoria própria (2024)

Terminada a exposição dos itens introdutórios à MQ, tendo como elemento motivador o experimento de dupla fenda, passou-se para o momento que constituiu o cerne do trabalho de intervenção, a saber, a apresentação do fenômeno de interferência clássica, a partir do uso do IMZ físico utilizado para experimentos de interferência em óptica, bem como o virtual utilizado para fins de simulação de interferência em escala quântica.

O equipamento físico utilizado no experimento foi o PHYWE-p2220810e Quantum eraser with the Mach-Zehnder interferometer, parcial e adaptado, composto por um laser, dois espelhos 100% refletores (E1 e E2) e por dois espelhos semirrefletores (S1 e S2).



**Figura 7:** Interferômetro Mach-Zehnder. Fonte: Autoria própria (2024)

Tal equipamento foi utilizado, com o auxílio dos alunos presentes, para a obtenção de padrões de interferência de ondas sobrepostas em experimento óptico.



**Figura 8:** Calibração do interferômetro Mach-Zehnder. Fonte: Autoria própria (2024)

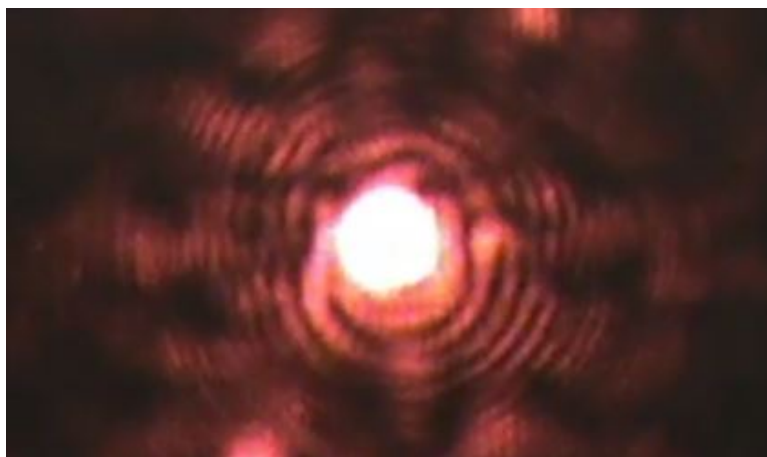
Com uma calibração ideal e uma disposição correta dos espelhos e espelhos semirrefletores foi possível conseguir identificar o padrão de interferência que se esperava. Na ausência de um anteparo móvel para a projeção na própria bancada, fez-se necessária a projeção do feixe de luz dividido no espelho semir-refletor S1, tanto na parede da frente quanto em um armário perpendicular. Tais feixes foram refletidos pelos espelhos E1 e E2 e se encontraram no espelho semirrefletor S2 onde, alinhados com o ponto de reflexão original, proporcionaram que uma interferência de ondas sobrepostas fosse visualizada. Mantendo S2 a interferência estava garantida; retirando S2 o padrão de interferência desaparecia. O que atesta que a intervenção do observador é substancial para a descrição do fenômeno como sendo ondulatório ou corpuscular.



**Figura 9:** Obtenção de padrão de interferência. Fonte: Autoria própria (2024)



**Figura 10:** Obtenção de padrão de interferência. Fonte: Autoria própria (2024)



**Figura 11:** Registro fotográfico aproximado do padrão de interferência, com as luzes do laboratório apagadas. Fonte: Autoria própria (2024)

O que se pretendia com essa primeira etapa, que se reservou a um experimento clássico de interferência de ondas sobrepostas, era demonstrar que, da mesma forma que o experimento de dupla fendas de Thomas Young (1773-1829) evidenciou que a natureza da luz é ondulatória, pelo fato de a mesma se comportar como se comportam as ondas mecânicas por exemplo, as ondas d'água, o IMZ endossa o experimento de dupla fendas, conseguindo os mesmos resultados de interferência alcançados por Young (1801). Contudo, como se disse, o experimento levado à cabo nesse primeiro momento ainda era um experimento clássico. Para o transformar em um experimento quântico seria necessário reduzir exponencialmente a intensidade da luz e, “além disso, utilizar detectores sensíveis à presença de um único fóton, como é o caso de uma fotomultiplicadora, que possui uma eficiência de 30% (ou seja, cerca de um terço dos fótons que nela incidem geram um sinal amplificado)” (Pessoa Jr., 1997, p. 32).

Em virtude de restrições técnicas para um experimento quântico, lançou-se mão do interferômetro Mach-Zehnder virtual 6.0 produzido pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (disponível [aqui](#)).

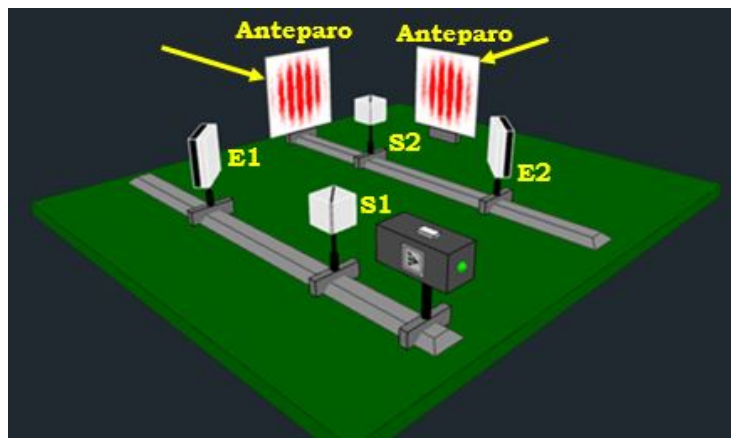


**Figura 12:** *Uso do interferômetro Mach-Zehnder virtual. Fonte: Autoria própria (2024)*

O que se pretendia com o experimento virtual era demonstrar o padrão de interferência de ondas sobrepostas, evidenciando um fenômeno ondulatório, e, ao mesmo tempo, questionar sobre o fato de o observador ter um lugar privilegiado na descrição do fenômeno quântico. E o que isso significa?

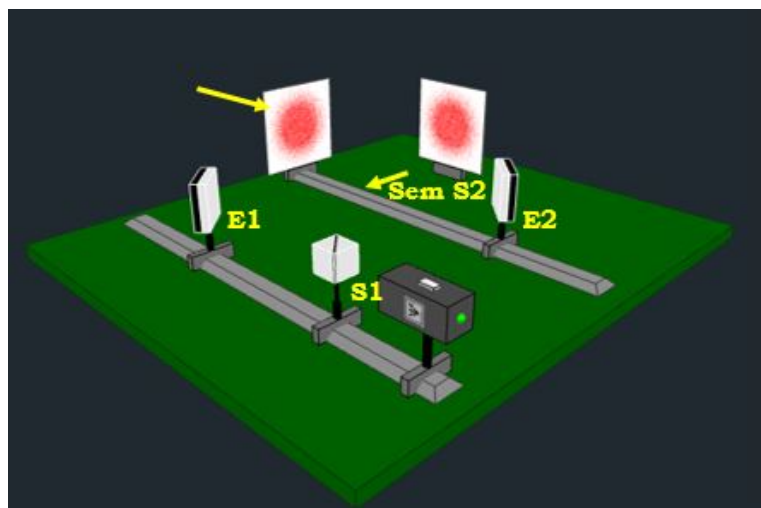
Conforme foi atestado pelos estudantes, tal como no experimento de dupla fenda, o ato de observar altera o estado do objeto quântico do fóton, por exemplo fazendo com que ele, ao ser observado (medido), deixe de apresentar um padrão de ondas (franjas de interferência) e passe a apresentar registros pontuais no anteparo (padrão corpuscular).

No caso do IMZ, tanto no físico como no virtual, ao se deixar o aparato experimental na disposição original, com todos os componentes do equipamento em suas devidas posições, o “comportamento” do objeto quântico é ondulatório. Caso se altere a posição de um elemento como o espelho semirrefletor S2 ou se acrescente um detector demolição<sup>3</sup> no caminho A ou B, o que se tem como resultado é um fenômeno corpuscular. Sendo assim, o que determina que o objeto quântico se manifeste como onda ou como partícula é a intervenção do observador frente ao aparato experimental. O observador acaba por ter um status privilegiado na definição do padrão de manifestação do objeto quântico.



**Figura 13:** *Padrão de interferência evidenciando fenômeno ondulatório. Fonte: Ostermann (2017)*

<sup>3</sup>Em termos resumidos, um detector demolição é aquele que absorve o fóton que interage com ele.



**Figura 14:** Padrão de interferência evidenciando fenômeno corpuscular. Fonte: Ostermann (2017)

Diante da obtenção de padrões de “comportamentos” dos objetos quânticos, vistos como paradoxais na escala do conhecimento clássico, encerrou-se o trabalho de intervenção apresentando aos alunos como algumas interpretações da MQ avaliam o fenômeno da dualidade onda-partícula e como se posicionam quanto ao papel do observador na consecução desses resultados. Dessa forma, as seguintes interpretações foram oferecidas:

a) *Interpretação Ondulatória:* segundo essa interpretação é possível que o fóton possa ter se dividido simetricamente em dois “meio-fótons” no primeiro espelho semirrefletor S1. Sendo assim, teríamos um pacote de onda que se dividiria em duas partes em S1 e se recombinariam em S2, conforme prevê a Física Ondulatória Clássica;

b) *Interpretação Corpuscular:* afirma que não dá para supor que o fóton segue um dos caminhos e nada vai pelo outro. Trata-se de uma interpretação que admite que a lógica ao nível quântico é de tipo “não-clássica”. Se o conectivo “ou” (ou onda, ou partícula) fosse definido de maneira diferente (como uma disjunção exclusiva<sup>4</sup>), o raciocínio (de que “não dá para supor que um fóton segue um dos caminhos e nada vai para o outro”) poderia ser invalidado.

c) *Interpretação Dualista Realista:* de acordo com essa interpretação é possível que o objeto quântico seja constituído por duas partes, ou seja, o fóton e a sua onda associada. Assim, o fóton seguiria uma trajetória, por A ou por B, mas simultaneamente a sua onda associada se dividiria em duas partes iguais: uma indo por A e a outra por B. Como as ondas se cancelam em direção ao detector D2, o fóton é obrigado a se direcionar para D1.

d) *Interpretação da Complementaridade:* conforme essa interpretação, o fenômeno pode ser ondulatório ou corpuscular, nunca os dois ao mesmo tempo. É a calibração do instrumento de medição que determinará o tipo de fenômeno a ser evidenciado.

e) *Interpretação Instrumentalista:* segundo os instrumentalistas, não tem sentido perguntar sobre a realidade por trás das medições. A Teoria Quântica mesmo em sua estranheza,

<sup>4</sup>Disjunção exclusiva é aquela que não admite que a verdade da asserção A reproduza na asserção B. Tratando-se da mesma asserção (função de verdade) “ou” A é verdadeiro “ou” B é verdadeiro, não os dois ao mesmo tempo. Por exemplo, ou Atenas vencerá a guerra o Esparta vencerá. Não pode acontecer que as duas vençam ao mesmo tempo, pois as asserções são mutuamente excludentes.

tem uma permissibilidade garantida pelas suas previsões estatísticas que são todas corretas (Pessoa Jr. 2023).

Dessa forma, concluiu-se a contextualização do conhecimento e, conseqüentemente, o momento expositivo da SEI, restando apenas a avaliação do processo.

#### IV.4. Da avaliação

Na etapa final da SEI o que se pretendeu foi avaliar, do ponto de vista formativo, o processo de aprendizagem dos alunos. Conforme preconiza Carvalho (2017, p. 13), a avaliação pretende ser um “instrumento de aprendizado de ações, atitudes e valores próprios da cultura científica” e que valorize também os conteúdos processuais e atitudinais. Dessa forma, ao final da SEI, foi organizado e aplicado um questionário sobre os pontos importantes que foram desenvolvidos durante a experiência, com perguntas seguidas das suas alternativas de resposta, para que os alunos discernissem sobre a resposta correta a partir do que experienciaram. As questões que foram postas são as que se seguem:

- 1) Qual é o objetivo principal do experimento que você participou envolvendo a dualidade onda-partícula e o interferômetro Mach-Zehnder?
  - a) Estudar a natureza dualística das partículas subatômicas.
  - b) Medir a velocidade das partículas no interferômetro.
  - c) Demonstrar a lei da conservação da energia.
  - d) Calibrar o equipamento de laboratório.
  - e) Observar a gravidade em ação.
  
- 2) Como o interferômetro Mach-Zehnder foi configurado para permitir a observação do comportamento de onda dos fótons?
  - a) Inserindo barreiras físicas no caminho dos fótons.
  - b) Usando detectores de partículas.
  - c) Utilizando campos magnéticos.
  - d) Aquecendo os fótons.
  - e) Não é possível observar o comportamento de onda dos fótons no interferômetro.
  
- 3) Quais foram os principais desafios que você visualizou durante a realização e simulação do experimento?
  - a) Dificuldade em entender as equações matemáticas envolvidas.
  - b) Problemas de calibração dos equipamentos.
  - c) Dificuldades na obtenção de fótons.
  - d) Conflitos com outros membros do grupo de pesquisa.
  - e) Falta de tempo para concluir o experimento.
  
- 4) Como o interferômetro foi modificado para observar o comportamento de partícula dos fótons?
  - a) Aumentando o comprimento dos braços do interferômetro.
  - b) Usando filtros para eliminar a interferência.
  - c) Introduzindo um espelho semirrefletor (S2) no caminho dos fótons.

- d) Aumentando a temperatura no laboratório.
- e) Não houve modificação no interferômetro para observar o comportamento da partícula.
- 5) Durante o experimento, você observou algum fenômeno de interferência de ondas?
- a) Sim. Observei um padrão de interferência de franjas.
- b) Não. Não observei nenhum fenômeno de interferência.
- c) Observei um movimento linear das partículas.
- d) Vi uma rotação dos fótons.
- e) As partículas se comportaram como partículas sem exibir interferência.
- 6) No vídeo visto por você, houve momentos em que você notou uma transição clara entre o comportamento de onda e de partícula dos fótons?
- a) Sim. Quando os fótons passaram por uma fenda estreita, eles exibiram o comportamento de partícula.
- b) Não. Não houve transição clara entre os comportamentos.
- c) Sim. Quando os fótons passaram por uma grade de difração, eles mostraram o comportamento de partícula.
- d) Sim. Quando aplicamos um campo magnético, eles se comportaram com partícula.
- e) Não. A transição não foi observada devido a erros na configuração do experimento.
- 7) Quais equipamentos ou instrumentos foram utilizados no experimento virtual?
- a) Câmaras fotográficas foram usadas para gravar o experimento, ajudando na análise posterior.
- b) Um osciloscópio foi utilizado para medir a velocidade dos fótons.
- c) Detectores de partículas foram usados para registrar a trajetória dos fótons.
- d) Um cronômetro foi empregado para medir o tempo de trânsito dos fótons.
- e) Um microscópio eletrônico foi usado para ampliar as partículas e facilitar a observação.
- 8) Como você acha que os resultados obtidos neste experimento contribuem para nossa compreensão da dualidade onda-partícula?
- a) Os resultados confirmam que a dualidade onda-partícula é uma teoria obsoleta.
- b) Os resultados não têm relevância para a dualidade onda-partícula.
- c) Os resultados reforçaram a ideia de que as partículas subatômicas sempre se comportam como ondas.
- d) Os resultados demonstraram que a dualidade é uma ilusão e as partículas têm sempre comportamento de partícula.
- e) Os resultados forneceram evidências concretas do comportamento dual das partículas atômicas.
- 9) Você teve a oportunidade de discutir os resultados e suas observações com os seus colegas e com o professor responsável?
- a) Sim. As discussões levaram a uma compreensão clara dos resultados.
- b) Não. Não houve discussões com colegas ou com o professor.
- c) Sim, mas as discussões não trouxeram clareza adicional aos resultados.
- d) Sim. As discussões revelaram discrepâncias significativas nos resultados.

- e) Não. As discussões foram interrompidas antes de chegarem a uma conclusão.
- 10) Com base em sua experiência neste experimento e na aula teórica que o precedeu, o que você acredita que poderia ser o potencial impacto ou aplicações práticas dos resultados da pesquisa? Marque a alternativa que para você está errada:
- Os resultados não têm aplicações práticas.
  - Os resultados podem ser aplicados para desenvolver novas tecnologias de comunicação.
  - Os resultados podem ser relevantes para a criação de dispositivos de imagem mais avançados.
  - Os resultados podem ter implicações na medicina.
  - Os resultados podem contribuir para o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas.

Em virtude das delimitações de espaço do presente veículo de comunicação científica, não será possível apresentar aqui a análise quantitativa das respostas dos alunos. Incentiva-se, fortemente, que o professor de Física interessado no assunto faça a aplicação da presente SEI para se certificar do quando tal ferramenta didática tem um efeito positivo no que diz respeito à consecução de conhecimento, à apreensão do significado de uma prática experimental e ao entendimento de um fenômeno físico, a despeito do pouco envolvimento nesta fase com o formalismo matemático.

## V. CONCLUSÃO

Esperava-se que esta SEI demonstrasse o problema da dualidade onda-partícula dos fótons em um ambiente controlado usando um IMZ físico, corroborado pelo uso do mesmo interferômetro em ambiente virtual. Os resultados, conforme se viu, forneceram informações valiosas sobre como os objetos quânticos se comportam em diferentes condições experimentais, além de contribuir para uma compreensão mais profunda da MQ e sobre o status privilegiado do observador em definir o comportamento do objeto quântico. E, o importante disso tudo, foi fazer com que os estudantes do Ensino Médio tivessem a oportunidade de participar de um momento como esse.

É conhecida a experiência generalizada, quase restritiva ao cálculo, que esses alunos têm com o ensino de Física Brasil afora, conforme salienta os antigos PCNs para o Ensino de Física. E isso é, muitas das vezes, desolador! Quando esses alunos têm a oportunidade de uma prática laboratorial, tal momento não significa somente uma fuga da sala de aula para participar um momento de descontração em um ambiente externo. O que se viu com essa SEI é que uma atividade bem orientada, motivada, provocativa e elucidativa produz muitos resultados em termos de conhecimento. Em todas as etapas da presente SEI viu-se o envolvimento, a atenção e a curiosidade dos alunos. Um simples vídeo motivador, em formato de cartoon, por exemplo, pode produzir efeitos que uma aula expositiva, centrada no professor, às vezes, não consegue. Por outro lado, colocar as mãos na massa (*hands on*), isto é, tentar montar um aparato experimental, colocar as peças nos seus devidos lugares, buscar atingir um efeito físico esperado e analisar os resultados é estimulante e encorajador. Talvez seja por isso que os antigos PCNs orientavam que o aprendizado em Física partisse da prática e de exemplos concretos (Brasil, 1998, p. 22).

Quando a prática assume o protagonismo do processo de ensino e aprendizagem, o que se vê é um estímulo extra para o conhecimento, pois o aluno aprende fazendo. O cálculo, a axiomatização e a linguagem matemática são sim imprescindíveis enquanto comunicação formal das mensurações. Contudo, faz-se necessário que o aluno, em Física, entenda o fenômeno, apreenda o conceito, distinga o modelo teórico e saiba apontar situações diferentes que são resolvi-das com abordagens também diferentes. Tudo isso parece ir ao encontro daqui-lo que preconizava a Comissão Internacional sobre Educação para o Século XXI da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (1992-1996), presidida por Jacques Delors, que em seu relatório intitulado Educação, um Tesouro a Descobrir, fixou o que foi chamado de os quatro pilares para a Educação no século XXI (Delors et al. 1998).

Segundo o relatório, a educação deve se apoiar no aprender a conhecer, isto é, na valorização da curiosidade sobre o novo que foi a mola-mestra da presente SEI; no aprender a fazer, ou seja, no estimular as habilidades criativas, construtivas e de produção de cada um é o que faz uma atividade experimen-tal, geralmente, sendo bem-sucedida; no aprender a conviver quando da socia-lização agregadora para a resolução de problemas e isso foi objeto do momen-to da problematização da presente SEI quando, em grupos, os alunos foram convidados a resolver o problema proposto; e no aprender ser que, dentre ou-tras coisas, prima pelo desenvolvimento do pensamento crítico não basta para o experimento que se saiba identificar e descrever o fenômeno, mais do que isso, faz-se necessário que criticamente se entenda como a tecnologia, para o seu desvelamento, pode nos beneficiar ou nos aniquilar.

Enfim, momentos como os propiciados pela aplicação de uma SEI são ímpares. Somente os que entendem a sua importância podem deles colher bons frutos. Que esse artigo seja uma motivação para que SEIs sejam instrumentos do ensino frequentes no campo da Física.

**Editora Responsável:** Maria de Fátima da Silva Verdeaux

---

## REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. *Psicología educativa: um punto de vista cognoscitivo*. Tradução ao espanhol de Roberto Helier. México: Editorial Trillas, 1976.
- BOHR, N. O Postulado Quântico e o Recente Desenvolvimento da Teoria Atômica. Trad. Osvaldo Pessoa Jr. In: PESSOA JR., O. (Org.). *Fundamentos de Física I Simpósio David Bohm*. São Paulo: Livraria da Física, 2000. p. 135-159.
- BOHR, N. *Física Atômica e Conhecimento Humano (Ensaios 1932-1957)*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular: educação é a base*. Brasília, DF: Ministério da Educação, 2018.

BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio)*. Brasília, DF: Ministério da Educação, 1998. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2023.

CAPECCHI, M. C.; CARVALHO, A. M. Atividade de laboratório como instrumento para a abordagem de aspectos da cultura científica em sala de aula. *Pro-Posições*, v. 17, n. 1, p. 137-153, 2016.

CARVALHO, A. M. P. O Ensino de Ciências e a Proposição de Sequências de Ensino Investigativas. In: (Org.). *Ensino de Ciência por Investigação: condições para implementação em sala de aula*. São Paulo: Cengage Learning, 2017. p. 1-20.

CARVALHO, A. M. P.; SASSERON, L. H. Ensino de Física por Investigação: referencial teórico e as pesquisas sobre as sequências de ensino investigativas. *Ensino Em Revista*, v. 22, n. 2, p. 249-266, 2015.

DELORS, J. et al. *Educação: um tesouro a descobrir*. Relatório para a UNESCO da Comissão Internacional sobre Educação para o Século XXI. São Paulo: Cortez, 1998.

HEISENBERG, W. *Física e Filosofia*. 3. ed. Trad. Jorge Leal Ferreira. Brasília: Editora UnB, 1995.

LING, S. J. et al. *University Physics III - Optics and Modern Physics*. Houston: Rice University Press, 2021. Disponível em: <<https://openstax.org>>. Acesso em: 06 nov. 2023.

OSTERMANN, F. *Virtual Mach-Zehnder Interferometer*. Version 6. Porto Alegre: UFRGS, 2017. Disponível em: <<http://www.lief.if.ufrgs.br/~cjhc/vmzi.html>>. Acesso em: 05 maio 2023.

PESSOA JR., O. *Conceitos de Física Quântica*. 4. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2019. Vol. 1.

PESSOA JR., O. Interferometria, Interpretação e Intuição: Uma Introdução Conceitual à Física Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 19, n. 1, p. 27-48, mar. 1997.

PESSOA JR., O. Interferômetro de Mach-Zehnder. In: *Conceitos de Física Quântica: Curso de um semestre (2023)*. São Paulo: USP, 2023. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7654961/mod\\_resource/content/1/CFQ6a-02.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7654961/mod_resource/content/1/CFQ6a-02.pdf)>. Acesso em: 03 maio 2023.

YOUNG, T. On the Theory of Light and Colours. *The Bakerian Lecture*, 1801. Disponível em: <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k55897m/f1.chemindefer>>. Acesso em: 02 maio 2023.

---