



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS, CÂMPUS DE ARAGUAÍNA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA**

LENILSON RODRIGUES DE OLIVEIRA

**TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DO INTERFERÔMETRO TIPO MACH-ZEHNDER
PARA O ENSINO MÉDIO UTILIZANDO UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA**

**Araguaína – TO
2019**

LENILSON RODRIGUES DE OLIVEIRA

**TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DO INTERFERÔMETRO TIPO MACH-ZEHNDER
PARA O ENSINO MÉDIO UTILIZANDO UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Lobo.

Araguaína – TO
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

O48t Oliveira, Lenilson Rodrigues de .
TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DO INTERFERÔMETRO TIPO
MACH-ZEHNDER PARA O ENSINO MÉDIO UTILIZANDO UMA
SEQUÊNCIA DIDÁTICA. / Lenilson Rodrigues de Oliveira. –
Araguaína, TO, 2019.
122 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do
Tocantins – Câmpus Universitário de Araguaína - Curso de Pós-
Graduação (Mestrado) Profissional Nacional em Ensino de Física,
2019.

Orientador: Matheus Pereira Lobo

1. O ensino de física quântica. 2. Teoria da aprendizagem
significativa. 3. Interferômetro de Mach-Zehnder. 4. Medições Livres de
Interação. I. Título

CDD 530

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde
que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica
da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

LENILSON RODRIGUES DE OLIVEIRA

TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA DO INTERFERÔMETRO TIPO MACH-ZEHNDER
PARA O ENSINO MÉDIO UTILIZANDO UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Lobo.

Data de aprovação: 26/11/2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Matheus Pereira Lobo (Orientador)
UFT – Araguaína/TO



Prof. Dr. Alvaro Julio Yucra Hancoco (UFT)



Prof. Dra. Liliانا Yolanda Ancalla Dávilla (UFT)

Araguaína, 26 de novembro de 2019.

Dedico esta dissertação a todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai e a minha mãe pela formação cidadã, ao meu irmão e minha irmã pela orientação quando criança e adolescente.

Agradeço a minha esposa Luana Priscilla Rodrigues Macêdo, pelo apoio e paciência durante essa jornada.

Agradeço ao meu professor orientador, Dr. Matheus Pereira Lobo, por toda a dedicação durante a elaboração e concretização da dissertação e do produto educacional.

Agradeço aos meus amigos de mestrado pela dedicação e compartilhamento de conhecimento adquirido por todo esse período que estivemos juntos.

Agradeço a todos os alunos do ensino médio em que tive o prazer de compartilhar o máximo de conhecimento possível.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Nenhuma grande descoberta foi feita jamais sem um palpite ousado”. (Isaac Newton)

RESUMO

O ensino relacionado à Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio teve um papel secundário por décadas. Todavia, vivemos em um mundo globalizado em que as informações são compartilhadas rapidamente e os avanços tecnológicos fazem parte do cotidiano dos indivíduos. Assim, os conteúdos voltados para Física Moderna e Contemporânea passaram a ser necessários, de modo que este conteúdo passou a ser obrigatório no Ensino Médio. Nesse contexto, apresentamos no presente trabalho o fenômeno da interferência quântica, mostrando a medição quântica livre de interação no interferômetro tipo Mach-Zehnder, um arranjo experimental análogo ao experimento da dupla fenda com elétrons, entretanto mais simples. A mecânica quântica avança em ritmo exponencial, as descobertas desse campo de estudo são surpreendentes e bastante atrativas. No percurso metodológico apresentamos a construção de uma sequência didática contendo os tópicos necessários para inserção de conceitos de Mecânica Quântica na Física do Ensino Médio. Efetuamos experimentos teóricos com uma análise qualitativa e uma descrição minuciosa de cada um dos tópicos, sendo um instrumento de investigação de aprendizagem dos discentes diante da introdução de novos conceitos. Em anexo a esta dissertação, o produto educacional gerado está na forma de texto (material didático) e contém todos os passos necessários para o entendimento do problema, incluindo questões conceituais e os cálculos matemáticos envolvidos. O objetivo foi proporcionar aos docentes e discentes do ensino médio um material didático de fácil compreensão do tema, agregando uma visão qualitativa com os procedimentos físicos. Espera-se, por meio deste trabalho, instigar a curiosidade dos alunos e mostrar como são resolvidos os problemas de pesquisa em física.

Palavras-chave: ensino de física, aprendizagem mecânica, aprendizagem significativa, interferômetro tipo Mach-Zehnder.

ABSTRACT

The teaching related to Modern and Contemporary Physics in High School has played a secondary role for decades. Yet we live in a globalized world where information is shared rapidly and technological advances are part of everyday life. Thus, the content focused on Modern and Contemporary Physics became necessary, so that this content became mandatory in High School. In this context, we present in this work the quantum interference phenomenon, showing the interaction-free quantum measurement in the Mach-Zehnder type interferometer, an experimental arrangement analogous to the double-slit experiment with electrons, however simpler. The quantum mechanics advances at an exponential rate, the findings of this field of study are surprising and quite attractive. In the methodological course we present the construction of a didactic sequence containing the necessary topics for the insertion of concepts of Quantum Mechanics in High School Physics. We carried out theoretical experiments with a qualitative analysis and a detailed description of each of the topics, being an instrument of investigation of learning of the students before the introduction of new concepts. In addition to this dissertation, the educational product generated is in the form of text (didactic material) and contains all the necessary steps to understand the problem, including conceptual questions and the mathematical calculations involved. The objective was to provide teachers and high school students with didactic material that is easy to understand the theme, adding a qualitative vision with physical procedures. It is hoped, through this work, to instigate students' curiosity and show how the research problems in physics are solved.

Keywords: physics teaching, mechanical learning, significant learning, Mach-Zehnder type interferometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem do interferômetro de Mach-Zehnder	42
Figura 2 – Estrutura do IMZ.....	43
Figura 3 – IMZ em regime quântico	44
Figura 4 – Interferômetro de Mach-Zehnder SEM objeto	51
Figura 5 – Interferômetro COM objeto obstruindo um dos caminhos	56
Figura 6 – Resultado da questão 1 antes da aplicação do produto.....	61
Figura 7 – Resultado da questão 1 depois da aplicação do produto	62
Figura 8 – Resultado da questão 2 antes da aplicação do produto.....	63
Figura 9 – Resultado da questão 2 após aplicação do produto.....	64
Figura 10 – Resultado da questão 3 antes da aplicação do produto.....	65
Figura 11 – Resultado da questão 3 depois da aplicação do produto	66
Figura 12 – Pré-teste com a questão 4	68
Figura 13 – Pós-teste com a questão 4.....	68
Figura 14 – Resultado da questão 5 antes da aplicação do produto.....	69
Figura 15 – Resultado da questão 5 depois da aplicação do produto	70
Figura 16 – Resultado da questão 6 antes da aplicação do produto.....	71
Figura 17 – Resultado da questão 6 depois da aplicação do produto	71
Figura 18 – Pré-teste com a questão 7	72
Figura 19 – Pós-teste com a questão 7.....	73
Figura 20 – Pré-teste com a questão 8	74
Figura 21 – Pós-teste com a questão 8.....	74
Figura 22 – Percentual de acertos da questão 1	76
Figura 23 – Percentual de assimilação da questão 2	77
Figura 24 – Nível de compreensão da questão 3	78
Figura 25 – Nível de assimilação da questão 4	79
Figura 26 – Nível de assimilação da questão 5	80
Figura 27 – Nível de compreensão da questão 6, com ou sem objeto obstruindo um dos caminhos	81
Figura 28 – Nível de compreensão das questões 7 e 8, com e sem objeto obstruindo um dos caminhos	82
Figura 29 – Nível de compreensão das questões 9 e 10, com e sem objeto obstruindo um dos caminhos.....	84

Figura 30 – Percentual dos alunos que conseguiram responder à questão 11
.....85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Competências sugeridas pelos PCN.....	22
Tabela 2 – Principais objetivos da Física moderna.....	25
Tabela 3 – Categorias para ensino de FCM	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EM – Ensino Médio

ENEM – Exame Nacional do Ensino Médio

FC – Física Contemporânea

FM – Física Moderna

FMC – Física Moderna e Contemporânea

FQ – Física Quântica

IMZ – Interferômetro de Mach-Zehnder

MQ – Mecânica Quântica

PCN – Parâmetros Curriculares Nacionais

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 1	18
1 O ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA	18
1.1 A abordagem da física quântica no ensino médio	18
1.2 O estudo da Física no Ensino Médio	20
1.3 Breve apresentação da abordagem da Física Moderna Contemporânea nos documentos oficiais	24
1.4 O ensino de mecânica quântica no Brasil	26
1.5 As Teorias de Ausubel: aprendizagem significativa	27
1.5.1 Os tipos de aprendizagem significativa	31
CAPÍTULO 2	33
2 CONTEXTO HISTÓRICO	33
2.1 Marcos históricos da física moderna e contemporânea	33
2.2 A Física Contemporânea no Ensino Médio	36
2.3 Interferômetro: contexto histórico	39
2.4 Interferômetro de Mach-Zehnder	41
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	45
3 AS FASES DA PESQUISA	45
3.1 Resumo de cada uma das seis aulas ministradas	46
3.2 Produto Educacional	48
3. 2. 1 Medições livres de interação sem objeto	51
3. 2. 2 Medições livres de interação com objeto	55
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS DADOS	60
4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
4.1 Aplicação do questionário apresentado no Apêndice A	61
4.2 Aplicação do questionário apresentado no Apêndice C	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE A	92

INTRODUÇÃO

A física é parte integrante das ciências naturais, sendo um componente fundamental para formação tanto de visão de mundo quanto para o pensamento humano. Dessa maneira, a física é uma ciência que possibilita a elaboração de modelos cósmicos, de partículas que formam a matéria, concomitantemente a isso, permite e colabora efetivamente com o desenvolvimento de novas tecnologias, com a inovação nas formas de obtenção de energia e na criação de novos materiais.

Vale ressaltar que os estudos de física desenvolvidos nos anos iniciais do século XX foram importantes por modificar a compreensão de conceitos acerca de espaço, tempo, energia e massa. Esses conhecimentos desenvolvidos originaram a física moderna, que estuda os fenômenos atômicos e astronômicos. A posteriori, ocorreu o surgimento da Física Contemporânea, a qual estuda campos e partículas subatômicas.

Com estudos posteriores, foi possível incluir novas teorias à Física Moderna e Contemporânea (FMC) e esses conhecimentos são imprescindíveis na formação contemporânea dos indivíduos, pois são agregados ao desenvolvimento das novas tecnologias e à cultura. Em contrapartida, a abordagem desses conteúdos no ensino médio não tem sido satisfatória, pois não acompanha efetivamente esse desenvolvimento.

Assim, é evidente que esses aspectos são negativos, e constituem-se como entraves no processo de alfabetização tecnológica e científica dos aprendizes, o que reflete na ruptura da relação da física com o cotidiano dos estudantes. Para tanto, é importante ressaltar o posicionamento dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) no tocante ao impasse.

Sendo assim, dentro desse contexto, a inserção de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para as aulas do ensino médio é necessária. Todavia, a preocupação não está apenas em ensinar os conteúdos de Física Moderna, mas também em como ensiná-los. Com isso, os acontecimentos presentes no âmbito social não podem ser desconsiderados durante o desenvolvimento dos conteúdos.

Ademais, quanto ao papel do professor, que deve ser visto como mediador do conhecimento e não como o detentor dele, isso implica na necessidade de ensinar por meio da investigação. Assim, isso refletirá em mudanças tanto na prática do

professor quanto na atitude do aluno, pois além de ser um questionador, o docente deve conduzir, estimular, propor desafios, não ficar na mera posição de expositor e sim orientador no processo de ensino (BULGRAEN, 2010). Nessa ótica, os discentes devem ser conduzidos a pensar, refletir, debater, saber justificar suas ideias concatenadamente, além de saber aplicar seus conhecimentos em novas situações, fazendo para isso o uso de conhecimentos matemáticos e teóricos.

Ressalta-se, também, que com o passar dos anos, Ciência e Tecnologia estão em um processo de evolução, diversas mudanças aconteceram na sociedade contemporânea, conforme Pinheiro; Matos; Bazzo (2007), passando a exigir novos métodos para o ensino de física, necessários e que sejam eficazes diante dessas transformações. A participação da sociedade tem papel central ao levantar questionamentos a respeito da evolução científico-tecnológica e se integrar no mundo em que vive, assim, induz-se uma reflexão dessas transformações que vêm ocorrendo no mundo contemporâneo.

É de fundamental importância o ensino ser pautado de forma interdisciplinar e de maneira contextualizada, permitindo uma visão crítica dos fenômenos naturais que acontecem, possibilitando assim que os estudantes possam ser capazes de analisar esses fenômenos, com base na teoria aplicada em sala de aula.

Partindo do argumento que para ser um cidadão contemporâneo e ter condições de exercer sua cidadania, precisa-se participar de decisões conscientes das mais variadas situações presentes no dia a dia. Continuamente temos que intervir e participar da realidade do meio em que vivemos (BRASIL, 1998; BRASIL, 2006). Porém, para isso acontecer, o indivíduo não pode ser um analfabeto científico, pois o mesmo torna-se um sujeito incapacitado de compreender e analisar de forma crítica sobre qualquer questionamento científico e tecnológico que ocorre na sociedade.

O ensino, conectado a uma abordagem interdisciplinar entre as áreas Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias é uma forma de desenvolver diversas competências e habilidades (BRASIL, 1998). Para que isso ocorra, a física deveria ser abordada de forma que se relacione com o cotidiano e por meio da utilização de ferramentas teóricas e que permitam caracterizações de uma aprendizagem mais sólida.

Diante dessa discussão, o presente trabalho tem como alvo principal a abordagem da física contemporânea, em particular o estudo do interferômetro e

suas aplicações no ensino médio. Para isso, elaboramos um material didático em uma abordagem simplificada que permite o professor atuar com confiança em suas aulas, através de um breve histórico sobre o interferômetro e suas aplicações tecnológicas, com a matemática adequada para o desenvolvimento de uma aprendizagem significativa nesse nível do ensino médio. Utilizamos, no desenvolvimento matemático, experimentos teóricos, ou seja, cálculos matemáticos com uma configuração diferente ao que o aluno está acostumado no ensino médio.

É essencial ao desenvolvimento e à implementação deste material diagnosticar o conhecimento prévio dos discentes sobre os conteúdos básicos do ensino médio de física e matemática. A dissertação está dividida em quatro capítulos. O primeiro trata da inclusão da Física Contemporânea (FC) no Ensino Médio, em que foram enumeradas as dificuldades e os desafios defrontados ao longo dos anos e a necessidade de sua introdução no currículo escolar na última fase da educação básica. No segundo capítulo é apresentado o interferômetro, como surgiu e suas aplicações, relacionando de forma contextualizada suas aplicabilidades no cotidiano.

O capítulo três discute o percurso metodológico do trabalho, assinalando os passos trilhados para produção deste estudo. Explicitamos a metodologia e as abordagens utilizadas para coleta e análise dos dados, as quais são respaldadas pelos aportes teórico-metodológicos correspondentes à análise do conteúdo. Descrevemos os resultados da aplicação dos questionários aos alunos, e os métodos utilizados para elaboração e aplicação do material didático produzido. Neste capítulo também realizamos a discussão da aplicação do produto educacional e quais seus efeitos para um ensino de física mais moderno e atual.

O capítulo quatro está reservado às análises e discussões dos resultados, fazendo uma reflexão sobre o processo de desenvolvimento e implementação do material didático. E, por fim, nas considerações finais apresentamos uma reflexão dos resultados obtidos por meio das análises desenvolvidas ao longo do trabalho.

CAPÍTULO 1

1 O ENSINO DA FÍSICA QUÂNTICA

1.1 A abordagem da Física Quântica no Ensino Médio

É constatado a partir de diversos estudos que a física estudada no âmbito escolar de nível médio no Brasil é defasada, de modo que muitas instituições de ensino não contemplam o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) em seus currículos escolares. A física clássica é trabalhada durante todo o ensino médio, corroborado a isso, Rocha (2001, p. 4) enfatiza que

Existe uma necessidade inerente à reforma curricular do Ensino Médio, de apresentar-se, nas disciplinas de física, entre outras, teorias científicas desenvolvidas mais recentemente. De modo que, pode-se dizer que, na maioria dos cursos de nível médio, a física que se ensina nas escolas está defasada de cerca de dois séculos.

Esses fatores implicam em outra problemática, pois os discentes do ensino médio retratam as aulas de física como enfadonhas, fora do seu contexto corriqueiro, o que não atende ao dinamismo dos estudantes. Isso reflete na falta de interesse pelas aulas, bem como não acompanha o desenvolvimento tecnológico que atrai a atenção dos alunos.

Mediante isso, Pinto (1999) acredita que é necessária uma transformação da física tradicional abordada nas escolas, é preciso contemplar o desenvolvimento da Física Moderna (FM) de modo efetivo, seja na explicação do surgimento dos fenômenos ou na constituição de uma visão de mundo renovada.

É preciso, assim, segundo Lobato (2005), desenvolver estratégias que transformem essa relação entre os discentes, de modo que seja também mais atraente, interessante, sendo essa uma tarefa que cabe ao professor de física. Dessa maneira, esse processo seria facilitado com a inserção do ensino de FMC no ensino médio, o que é considerado urgente e necessário pelos docentes e físicos, tanto no cenário brasileiro quanto internacional. Faz-se necessário, assim, que os conteúdos da FM sejam inseridos efetivamente nos currículos do Ensino Médio (EM).

Sabemos que essa proposta não é nova e vem sendo discutida em pesquisas nacionais e internacionais, e recentemente no tocante ao ensino de física no EM. Assim, medidas urgentes devem ser tomadas quanto à atualização do currículo do EM. Nesse viés, Pereira e Ostermann (2007, p. 5) consideram

a deterioração da qualidade do ensino de física das escolas públicas evidenciada pela baixa qualificação acadêmica de professores, desmotivação dos estudantes, demasiada ênfase na cinemática e pela ausência de temas de física moderna e contemporânea.

As orientações dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) também abordam a necessidade e a importância do ensino de FMC no ensino, bem como nas licenciaturas, pois é de grande importância o desenvolvimento teórico e prático no tocante às variedades de fenômenos implicados na teoria quântica, por exemplo. O entendimento desses elementos contribui também para ampliação da visão acerca dos impactos tecnológicos vivenciados atualmente, como também na inserção de novas abordagens quanto às discussões conscientes entre ciência e ética. Assim, de acordo com os PCN,

Compreender formas pelas quais a física e a tecnologia influenciam nossa interpretação do mundo atual, condicionando formas de pensar e interagir. Por exemplo, como a relatividade ou as ideias quânticas povoam o imaginário e a cultura contemporânea, conduzindo à extrapolação de seus conceitos para diversas áreas, como para a Economia ou Biologia (BRASIL,2002, p.17).

Em contrapartida, mesmo com a recomendação dos documentos oficiais apresentados pelo Ministério da Educação, as instituições de ensino no país persistem em não abordar os conteúdos no EM. Sabe-se que a inserção desses conteúdos no ensino são de fundamental importância, por serem interessantes e ao mesmo tempo fascinantes, todavia, diversos entraves impossibilitam tal efetivação. Para tanto, Barros (2011, p. 12) destaca como principais problemáticas:

o grande formalismo matemático envolvido no ensino de mecânica quântica; a dificuldade em integrar o currículo da mecânica clássica e da mecânica quântica dentro da mesma programação; as novidades conceituais desse novo assunto que se distanciam da física clássica; o tratamento experimental da física quântica e a falta de preparo dos próprios professores para o ensino desse assunto.

Assim, medidas urgentes são necessárias para atenuar a problemática para melhor desenvolvimento do ensino de física no Brasil. Dessa maneira, a próxima seção tratará do ensino de física no EM, ressaltando os anseios que vêm sendo trabalhados no contexto do ensino brasileiro.

1.2 O estudo da Física no Ensino Médio

A realidade brasileira acerca dos desafios enfrentados nas instituições de ensino são diversas, sobretudo, no que se refere ao ensino de física, uma vez que os discentes veem a física e seus respectivos conteúdos como algo difícil e fora de sua realidade. Nesse contexto, o docente anseia cotidianamente pela busca de métodos que facilitem o entendimento e interesse dos estudantes.

Mediante essa necessidade em desenvolver a integração dos alunos com o mundo tecnológico atual, é imprescindível que alternativas de reorganização curricular para o EM sejam realizadas no tocante à formação do cidadão. Faz-se necessário, então, que os PCN apresentem novas metas e objetivos para o ensino, e como primeira medida seria a ruptura com o modelo tradicional, o qual enfatiza a memorização de fórmulas, a repetição sistemática, que na maioria das vezes é descontextualizada e não condiz com a realidade dos discentes.

Tais medidas para reorganizar o currículo relacionam-se intimamente com a nova visão significativa que o trabalho se dá no contexto globalizado, de modo que o EM possa apropriar-se desse conhecimento de forma efetiva, no tocante à preparação cidadã, assim como para o mercado de trabalho. Quanto a essas mudanças, os PCN (2000, p. 13) ressaltam, quanto à ruptura com os moldes tradicionais que

A perspectiva é de uma aprendizagem permanente, de uma formação continuada, considerando como elemento central dessa formação a construção da cidadania em função dos processos sociais que se modificam. Alteram-se, portanto, os objetivos de formação no nível do Ensino Médio. Prioriza-se a formação ética e o desenvolvimento da autonomia intelectual e do pensamento crítico. (PCN – bases legais 2000. p. 13)

Assim, a mera memorização de conteúdos não é justificada, principalmente pela superação desses moldes, implicada pelo acesso cada vez mais facilitado pela tecnologia. Para tanto, o principal anseio é de que os estudantes desenvolvam competências básicas de reflexão, que possibilite continuamente o desenvolvimento de suas capacidades de aprendizagem.

Ademais, quanto ao currículo, é importante que sejam contemplados conteúdos que sejam voltados para a formação cidadã dos estudantes, primando sobretudo, pelas experiências subjetivas, pela vida em sociedade e as atividades produtivas. Isto posto, os PCN explicitam claramente que o currículo deve estar em

consonância com os eixos básicos que norteiam a escolha dos conteúdos, o qual vislumbra as habilidades e competências a serem desenvolvidas no EM. Assim, enfatizam que

O histórico-cultural dimensiona o valor histórico e social dos conhecimentos, tendo em vista o contexto da sociedade em constante mudança e submetendo o currículo a uma verdadeira prova de validade e de relevância social. Um eixo epistemológico reconstrói os procedimentos envolvidos nos processos de conhecimento, assegurando a eficácia desses processos e a abertura para novos conhecimentos (PCN Ensino Médio, 2000, p.15) .

Ainda de acordo com os documentos oficiais, o ensino de física deve voltar-se para a construção de cidadãos completos e atuais, que estejam a par de instrumentos que os possibilitem a compreensão, participação e intervenção do âmbito social o qual estão inseridos, para que no final de sua trajetória no EM, esses discentes possam desenvolver capacidades de compreensão tecnológica, bem como do mundo a seu redor. E enfatizam os PCN do Ensino Médio (2000, p. 2) que

A física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos.

Pensando-se nas novas exigências do mundo contemporâneo, as orientações curriculares para o Ensino Médio (2006) assinalaram que o ensino e o currículo de física devem passar por modificações, de modo que se adequem ao panorama atual. Todavia, o que suscita diversos questionamentos é a forma como os conteúdos são abordados, como o uso dos livros didáticos e a preocupação com a grade exigida nos vestibulares e processos seletivos, de modo que a compreensão dos conteúdos pelos discentes fica em último plano.

O ideal seria que os docentes voltassem sua atenção para as características fundamentais da ciência, ou seja, a dimensão investigativa, que não é abordada efetivamente nas escolas e pouco exigida em processos seletivos, para tanto, as orientações curriculares para o Ensino Médio (2006, p. 45) apresentam que

Na escola, uma das características mais importantes do processo de aprendizagem é a atitude reflexiva e autocrítica diante dos possíveis erros. Essa forma de ensino auxilia na formação das estruturas de raciocínio, necessárias para uma aprendizagem efetiva, que permita ao aluno gerenciar os conhecimentos adquiridos.

Sendo assim, para que as medidas até aqui discutidas nos documentos oficiais sejam implementadas efetivamente nas instituições de ensino, desafios devem ser superados, principalmente no que tange à compreensão das competências, seja a partir da relação didática ou pela referência dos saberes escolares. As Orientações Curriculares para o Ensino Médio ressaltam ainda que deve-se lembrar da diferença entre física abordada em sala de aula e a física como ciência, mesmo que as duas sejam implicadas intrinsecamente, pois a física estudada nas escolas está simplificada nos livros didáticos, o que permite a constatação de que está distante da tecnologia contemporânea.

Nesse contexto, as competências devem ser compreendidas como forma de estabelecer a relação didática em voga, por isso a concepção dessa noção de competência, vista como problemática referencial dos saberes no ensino dão sentido aos conteúdos escolares. Sendo assim, é preferível que conteúdos fragmentados e descontextualizados sejam evitados, e que passem a ser trabalhados de maneira efetiva, contextualizada e prática, trazendo a física para a realidade dos alunos.

Em outro âmbito, é pertinente ressaltar que o conhecimento da física assimilado durante sua vida, em todos os aspectos, não é passível de ser ensinado em sua plenitude no EM. Assim, deve-se selecionar o que de fato é fundamental no âmbito conceitual e matemático, ou seja, é importante que as referências sejam apropriadas. Para tanto, os PCN sugerem como principais competências, a contextualização sociocultural, a representação e comunicação, e a investigação e compreensão. Para melhor exemplificar, apresentamos na Tabela 1 algumas considerações acerca das orientações complementares aos PCN.

Tabela 1 – Competências sugeridas pelos PCN

Representação e Comunicação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reconhecer e saber utilizar corretamente símbolos, códigos e nomenclaturas de grandezas da física, por exemplo, reconhecer símbolos de massa ou volume. ▪ Ler e interpretar corretamente tabelas, gráficos, esquemas e diagramas, apresentados em textos, por exemplo, interpretar um gráfico de crescimento, ou da variação de temperaturas ambientes. ▪ Ler e interpretar informações apresentadas em diferentes linguagens e representações (técnicas) como, por exemplo, um manual de instalação de equipamento. ▪ Expressar-se de forma correta e clara em correspondência para os meios de comunicação ou via internet, apresentando pontos de vista, solicitando informações ou esclarecimentos técnico/científicos.
------------------------------------	--

<p>Investigação e Compreensão</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frente a uma situação ou problema concreto, reconhecer a natureza dos fenômenos envolvidos, situando-os dentro do conjunto de fenômenos da física e identificar as grandezas relevantes, em cada caso. ▪ Reconhecer a relação entre diferentes grandezas, ou relações de causa e efeito, para ser capaz de estabelecer previsões. ▪ Reconhecer a existência de invariantes que impõem condições sobre o que pode e o que não pode acontecer, em processos naturais, para fazer uso desses invariantes na análise de situações cotidianas. ▪ Reconhecer a conservação de determinadas grandezas, como massa, carga elétrica, corrente etc., utilizando essa noção de conservação na análise de situações dadas. ▪ Fazer uso de formas e instrumentos de medida apropriados para estabelecer comparações quantitativas. ▪ Conhecer modelos físicos microscópicos, para adquirir uma compreensão mais profunda dos fenômenos e utilizá-los na análise de situações-problema. ▪ Construir uma visão sistematizada dos diversos tipos de interação e das diferentes naturezas de fenômenos da física, para poder fazer uso desse conhecimento de forma integrada e articulada. ▪ Reconhecer na análise de um mesmo fenômeno as características de cada ciência, de maneira a adquirir uma visão mais articulada dos fenômenos.
<p>Contextualização Sociocultural</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época. ▪ Perceber o papel desempenhado pelo conhecimento físico no desenvolvimento da tecnologia e a complexa relação entre ciência e tecnologia ao longo da história. ▪ Compreender a física como parte integrante da cultura contemporânea, identificando sua presença em diferentes âmbitos e setores. ▪ Compreender formas pelas quais a física e a tecnologia influenciam nossa interpretação do mundo atual, condicionando formas de pensar e interagir. ▪ Acompanhar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo. ▪ Reconhecer que, se de um lado a tecnologia melhora a qualidade de vida do homem, do outro ela pode trazer efeitos que precisam ser ponderados para um posicionamento responsável. ▪ Reconhecer, em situações concretas, a relação entre física e ética. ▪ Reconhecer que a utilização dos produtos da ciência e da tecnologia nem sempre é democrática, tomando consciência das desigualdades e da necessidade de soluções de baixo custo.

Diante das competências apresentadas, ressalta-se a importância da competência estudada, conforme estabelecido pelas Orientações Curriculares para o Ensino Médio, de que a física busque e assegure no EM que a competência desenvolvida instigue o questionamento e a reflexão, bem como o anseio por conhecer o mundo ao seu redor. Tais aspectos desenvolvem aos poucos, um estímulo pelas aulas, sendo assim,

o aluno cuja competência investigativa tiver sido adequadamente desenvolvida na escola, ao deparar-se com situações problema para cuja solução os conhecimentos adquiridos são insuficientes, poderá recorrer a livros, à Internet, ou consultar um especialista para encontrar respostas razoáveis. Portanto, a construção das competências não se encerra na escola, mas esse é o ambiente no qual se podem oferecer subsídios e possibilidades para que tal ocorra. Para isso, a contextualização e a interdisciplinaridade devem ser consideradas. Um outro ponto que vale a pena lembrar é a questão do tempo de aprendizagem de cada aluno, que muitas vezes, é diferente do tempo pedagógico (Orientações Curriculares Para o Ensino Médio, 2006, p. 49).

E o que se tem observado é que isso não ocorre na prática pelo ensino tradicional, pois dissocia o que é desenvolvido em sala de aula com os acontecimentos do mundo.

1.3 Breve apresentação da abordagem da Física Moderna Contemporânea nos documentos oficiais

É evidente que é papel da escola auxiliar na compreensão e visão de mundo dos discentes. Observa-se, também, que mesmo que o dia a dia seja considerado o meio para realizar a contextualização dos assuntos trabalhados em sala de aula, não se deve utilizá-los como sinônimos, pois a contextualização deve explicar as situações mais específicas de modo superficial, ou seja, a partir do senso comum.

E é sabido que o conhecimento científico apresenta características que rompem com o senso comum, e este deve partir do conhecimento prévio do estudante para ser transformado em conhecimento científico. Desse modo, com a contextualização espera-se que ocorra uma reflexão crítica ao senso comum, e isso refletirá em mecanismos para que o estudante anseie por novos conhecimentos e possa da mesma maneira compreendê-los. Corroborado a isso as Orientações Curriculares para o Ensino Médio (2006, p. 51) apresentam que

A contextualização como recurso didático serve para problematizar a realidade vivida pelo aluno, extraí-la do seu contexto e projetá-la para a análise. Ou seja, consiste em elaborar uma representação do mundo para

melhor compreendê-lo. Essa é uma competência crítico-analítico e não se reduz à mera utilização pragmática do conhecimento científico.

Mediante essa contextualização, a FMC faz parte do cotidiano, sendo também observada de maneira interdisciplinar, ou seja, podemos relacioná-la com os mais variados setores produtivos, como a indústria tecnológica, a medicina, a engenharia de materiais, dentre muitas outras. Os PCN+ pontuam como principais objetivos no tocante à física moderna, ressaltados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais objetivos da física moderna

Matéria e suas propriedades	Utilizar os modelos atômicos propostos para a constituição da matéria para explicar diferentes propriedades dos materiais (térmicas, elétricas, magnéticas etc.); Relacionar os modelos de organização dos átomos e moléculas na constituição da matéria às características macroscópicas observáveis em cristais (sólidos e líquidos), polímeros, novos materiais etc.; compreender a constituição e organização da matéria viva e suas especificidades, relacionando-as aos modelos físicos estudados.
Radiações e suas interações	Identificar diferentes tipos de radiações presentes na vida cotidiana, reconhecendo sua sistematização no espectro eletromagnético (das ondas de rádio aos raios gama) e sua utilização através das tecnologias a elas associadas (radar, rádio, forno de micro-ondas, tomografia etc.); Compreender os processos de interação das radiações com meios materiais para explicar os fenômenos envolvidos em, por exemplo, fotocélulas, emissão e transmissão de luz, telas de monitores, radiografias; Avaliar efeitos biológicos e ambientais do uso de radiações não ionizantes em situações do cotidiano.
Energia nuclear e Radioatividade	Compreender as transformações nucleares que dão origem à radioatividade para reconhecer sua presença na natureza e em sistemas tecnológicos; Conhecer a natureza das interações e a dimensão da energia envolvida nas 30 transformações nucleares para explicar seu uso em, por exemplo, usinas nucleares, indústria, agricultura ou medicina; Avaliar os efeitos biológicos e ambientais, assim como medidas de proteção, da radioatividade e radiações ionizantes.
Eletrônica e Informática	Identificar a presença de componentes eletrônicos, como semicondutores, e suas propriedades nos equipamentos tecnológicos; identificar elementos básicos da microeletrônica para compreender o processamento de informação (processadores, microcomputadores etc.), redes de informática e sistemas de automação; acompanhar e avaliar o impacto social e econômico da automação e informatização na vida contemporânea.

Fonte: (PCN+, Ensino Médio, p. 2).

1.4 O ensino de mecânica quântica no Brasil

As pesquisas em ensino de física quântica ainda são consideradas recentes no Brasil, todavia vem sendo desenvolvidas ao longo dos anos, apresentando uma boa bibliografia sobre o assunto, como as concepções dos estudantes acerca de conteúdos de mecânica quântica, estudos sobre estratégias didáticas, dentre outros (LOBO et. al, 2018).

Dessa maneira, a partir do panorama quanto ao ensino de física, os discentes apresentam dificuldades em assimilar os conceitos relativos à mecânica quântica, isso ocorre na maioria das vezes pela abordagem formal apresentada aos alunos. Nessa perspectiva, Moreira e Greca (2001, p. 38) explicitam que

“a abordagem formal, ainda que possibilite aos estudantes aplicar rapidamente a mecânica quântica, cria uma barreira para a compreensão, pois muitos dos conceitos fundamentais, isto é, a amplitude de probabilidade, operadores representando observáveis como energia e momentum, o conceito global do que um estado pareceria surgir magicamente (...)”

Entretanto, é pertinente analisarmos pelo viés de que para o discente entender de fato os conceitos apresentados, a metodologia deve ser modificada, de modo que seja aliado o conhecimento de mundo do aluno com estes conceitos, sobretudo, nos cursos introdutórios de mecânica quântica. É importante salientar, também, que o assunto não deve ser fechado para os físicos teóricos, levando-se em conta a relevância do tema para o desenvolvimento da tecnologia.

No tocante às novas propostas didáticas voltadas para as licenciaturas, para o EM e disciplinas específicas como as das ciências exatas, pouco se tem discutido e produzido, e isso só reforça a importância em se criar estratégias de ensino, bem como ampliar as pesquisas na área de Física Quântica.

Pensando-se nessas abordagens, Pereira e Ostermann (2007) categorizaram uma pesquisa em que apresentam cinco categorias para o ensino de FMC, as quais estão destacadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Categorias para o ensino de FMC

Primeira Categoria	Justificativas para pesquisa sobre o ensino de física moderna contemporânea
Segunda Categoria	Propostas testadas em sala de aula que apresentam resultados de aprendizagem
Terceira Categoria	Concepções alternativas sobre temas de física moderna contemporânea
Quarta Categoria	Recurso didáticos e bibliografia de consulta para professores
Quinta Categoria	Análise de livros didáticos e documentos educacionais que contemplam física moderna contemporânea

Fonte: (PEREIRA e OSTERMANN, 2007).

Destarte, mediante os entraves quanto ao ensino de física, sobretudo na formação de novos professores, é de fundamental importância a produção de materiais voltados para esse público, abordando a mecânica quântica. O material deve ser completo, no âmbito conceitual e matemático, para que possa ser aplicado aos alunos do EM e que supra a demanda da licenciatura para que habilite o futuro docente a ensinar e discutir com seus alunos os elementos basilares que envolvem a mecânica quântica.

1.5 As Teorias de Ausubel: aprendizagem significativa

Compreende-se que a aprendizagem significativa foi originalmente proposta na teoria de David Ausubel por volta de 1968 e se trata de uma aprendizagem em que novas informações se relacionam com a estrutura cognitiva do indivíduo. Para tanto, Ausubel (1968) explicita que existe aprendizagem significativa na medida em que esse novo conhecimento está implicado de modo não arbitrário e não literal à estrutura cognitiva do aprendiz.

No momento em que o aluno memoriza conceitos, leis, fórmulas que nunca foram estudadas, e armazena as informações de forma aleatória, não ocorrendo a devida interligação entre o novo e o já existente, isso caracteriza a aprendizagem mecânica. Já na aprendizagem significativa, observa-se que uma nova informação adquirida pelo indivíduo assume um significado para o mesmo por meio de sua estrutura cognitiva de conhecimentos já existentes, possibilitando ao aluno

conquistar novos conhecimentos mediante a interação de novas informações com os conhecimentos já estabelecidos na sua estrutura cognitiva, com adequado grau de compreensão, distinção e estabilidade (MOREIRA, 2012).

Nesse viés, Moreira (1999) explana que Ausubel não afirma que a aprendizagem mecânica é totalmente distinta da significativa, e sim um processo continuado em que a mecânica pode se tornar significativa. A física contemporânea pode retratar muito bem a passagem da aprendizagem mecânica do aluno que nunca estudou física quântica, para uma aprendizagem significativa.

Desse modo, os subsunçores são conceitos pré-estabelecidos e relevantes na estrutura cognitiva do aluno. Ausubel utiliza como apoio as novas informações para uma formação de uma aprendizagem significativa. Desse modo, subsunçor é um conhecimento já constituído na estrutura cognitiva do indivíduo, possibilitando dar significado a outros conhecimentos (AUSUBEL; NOVAK; HANESIAN, 1980; MOREIRA, 2013).

Diante de novas informações adquiridas e fundamentadas de acordo com os conhecimentos anteriores, ocorrem também modificações, ou seja, os subsunçores conquistam novos significados, tornando-se mais concretos. O surgimento de novos subsunçores faz com que no decorrer da aprendizagem significativa, a estrutura cognitiva fique constantemente se reorganizando; dessa forma, o conhecimento vai sendo construído (AUSUBEL et al., 1983; MOREIRA, 1982).

Supondo que o aluno nunca estudou FQ e não possui subsunçores nessa área de conhecimento, devido o tema ser completamente novo para o discente, Ausubel destaca a importância da aprendizagem mecânica, para que se torne significativa. Quando o aluno aprende, significativamente, por exemplo, o que é vetor no ensino médio, e depois obtém mais informações sobre suas propriedades na física quântica, o subsunçor se torna mais evidente e mais amplo no campo da abstração, a servir de base para novas informações significativas. Segundo Moreira (1982, p.160), “este processo dinâmico característico da estrutura cognitiva chama-se diferenciação progressiva”.

A relação entre subsunçores pode ocorrer também na aprendizagem significativa, ou seja, na estrutura cognitiva há uma relação entre saberes já bem palpáveis. Citando um exemplo do estudo da dualidade onda-partícula, observamos que aqueles estudantes que compreendem a experiência de Thomas Young, conhecido pela experiência da dupla fenda (FILHO e SIQUEIRA, 1993), que

possibilitou a determinação ondulatória da luz e também a natureza corpuscular de Newton, estes obtêm uma percepção da relação destes pontos tendo um significado de tal maneira que eles conseguem identificar o que é um fóton e o seu significado quântico, com isso o aluno é capaz de interligar significados existentes na estrutura cognitiva que já estavam devidamente materializados.

Segundo Ausubel, para que ocorra uma aprendizagem significativa é essencial que o discente tenha uma motivação prévia para aprender, e que o material seja potencialmente significativo (MOREIRA, 1999).

Quando ocorre um entusiasmo por parte do aluno para relacionar de maneira não arbitrária e substantiva, um novo material potencialmente significativo, observa-se em sua estrutura cognitiva uma evolução na construção do conhecimento do discente. Um material potencialmente significativo tem como função primordial retirar conceitos prévios do estudante a fim de criar condições de aprendizagem. Alguns dos exemplos de materiais potencialmente significativos utilizados são: figuras, filmes, simulação computacional, experimento teórico ou laboratorial, dentre outros. Desse modo, para exercer a função de relacionar os subsunçores com as novas informações que o aluno adquire, o material potencialmente significativo não precisa ser necessariamente um material complexo ou carregado de tecnologia (MOREIRA, 2013).

Moreira ressalta também que as atividades colaborativas em grupos reduzidos, além dos organizadores prévios, trazem um facilitador para a aprendizagem significativa, pois permitem as trocas de informações, colocando o professor no referencial de mediador.

Ademais, quando os estudantes discutem e compartilham ideias com seus colegas, potencializando o interesse pelo tema proposto, segundo Moreira (2013) se faz neste momento a chamada aprendizagem colaborativa, visto que os subsunçores tornam-se mais estruturados. A participação em debates dos discentes tem como consequência o comprometimento do aluno na busca pelo seu próprio conhecimento, interligando os conhecimentos prévios com os novos e desenvolvendo o raciocínio crítico. Logo, os alunos atraídos com todos esses elementos podem simpatizar mais com as aulas e, ainda mais, criarem condições de adquirir uma aprendizagem significativa.

O ensino-aprendizagem praticado na maioria das escolas brasileiras, especificamente na disciplina de física, caminha em direção oposta às ideias de

Ausubel. No geral, há uma reprodução dos exercícios dos livros didáticos adotados por parte dos professores, e a avaliação de aprendizagem não foge daquele modelo feito durante as aulas expositivas. Com o agravante de questões de vestibulares antigas e ainda não sendo contextualizadas e nem apresentam um grau de complexidade progressivo. Nesse contexto, os alunos se sentem desmotivados para determinado assunto exposto, e assim não podem ser explorados os conteúdos potencialmente significativos.

Assim, para facilitar o entendimento dos alunos em tópicos teóricos de FQ, utilizaremos a aprendizagem mecânica no início para uma transposição didática e, em seguida, para uma aprendizagem significativa, buscando a superação das dificuldades relacionadas à falta de embasamento matemático e físico.

A utilização da matemática, como meio de entendimento do processo, será necessário para melhor visualização de conceitos abstratos que estão internamente relacionados com o estudo do interferômetro. Desse modo, o material desenvolvido potencialmente significativo provoca um despertar e um comprometimento dos discentes na conquista de seu próprio aprendizado, de forma que interligue o novo conhecimento não de forma arbitrária e literal em sua estrutura cognitiva, mas proporcionando a aprendizagem significativa (MOREIRA, 1999).

Esperamos que com as explicações teóricas, em conjunto com cálculos matemáticos envolvendo a física, e também com a disponibilidade de textos de apoio com fundamentos das ideias de Ausubel, seja possível esclarecer fenômenos físicos, ou seja, partindo de casos mais gerais, e posteriormente especificando o caso dos fenômenos quânticos (neste trabalho utilizamos o IMZ) e, gradativamente, distinguindo os conceitos e destacando seus aspectos mais relevantes. Em vista disso, almejamos que a física teórica possibilite ao aluno uma reflexão sobre as atividades realizadas, vinculando uma abordagem didática apresentada aqui, de forma que facilite significativamente as estratégias de ensino e alcance a tão esperada aprendizagem significativa.

Estrutura cognitiva é a compreensão de um determinado conteúdo associada à organização a partir das ideias de uma pessoa, além disso, consiste no conteúdo e organização de ideias em certa área específica do conhecimento, isto é, enfatiza o armazenamento, a aquisição e a organização de ideias no cérebro de uma pessoa. Para Ausubel, a estrutura cognitiva do indivíduo é muito hierarquizada e organizada,

no sentido de que as mais variadas ideias se categorizam conforme a relação que estabelecem entre si.

Além do mais, é nessa estrutura que se estabelecem e ordenam novas ideias e conceitos que a pessoa internaliza e aprende progressivamente. Consoante a isso, vale destacar a estrutura cognitiva defendida pela teoria da atividade, definida por Ausubel. Enfatiza-se aqui, portanto, a aquisição, o armazenamento e a organização das ideias, de modo que na teoria da atividade este conceito relaciona-se aos processos mentais superiores, que irão determinar o modo como o indivíduo estrutura suas atividades, e que estão na base da interação do indivíduo com o mundo objetivo (FARIA, 1989). Nesse contexto, analisando o ensino na visão ausubeliana, este sugere em termos significativos:

- a) detectar a estrutura de significados acolhendo um contexto do conteúdo de ensino;
- b) achar os subsunçores que façam a conexão necessária do tema proposto para a aprendizagem significativa;
- c) identificar os significados já existentes na estrutura cognitiva do indivíduo;
- d) preparar um conteúdo com uma sequência lógica, selecionando um material que esteja de acordo com a estrutura curricular nacional;
- e) ensinar usando organizadores prévios, ou seja, ligações cognitivas entre novos conhecimentos e aqueles já existentes na estrutura cognitiva do indivíduo;
- f) relacionar os significados que o discente já possui em sua estrutura cognitiva com o que ele necessitaria ter para aprender significativamente o conteúdo de ensino.

Além disso, é necessária uma relação bem estabelecida entre o conhecimento adquirido de forma contínua e contemporânea e aquele preexistente, adequando assim aos novos materiais de aprendizagem (MOREIRA, 2012).

1.5.1 Os tipos de aprendizagem significativa

Existem três tipos de aprendizagem significativa propostos por Ausubel. O primeiro tipo é a **Aprendizagem Significativa Representacional**, considerado o mais básico dos três, pois consiste em uma associação simbólica primária, a qual atribui significados a símbolos. Nessa abordagem o aluno assimila o significado de palavras ou o que elas representam.

O segundo tipo é a **Aprendizagem Significativa Conceitual**, que é um tipo de aprendizagem representacional, de modo que os conceitos também são representados por símbolos particulares. A apreensão de um conceito necessita da compreensão e da identificação do seu significado.

No terceiro tipo de aprendizagem significativa, Ausubel o classifica como **Proposicional**. Nessa abordagem o aprendiz compreende o significado das ideias expressas por grupos de palavras que são combinadas, ou seja, nesse tipo de aprendizagem as palavras não são isoladas. O modo como a aprendizagem significativa se dá é classificado em aprendizagem subordinativa e superordenada. Estas se relacionam à medida em que os novos conceitos ligam-se à estrutura cognitiva do aprendiz.

Na aprendizagem subordinativa, novos conceitos são subordinados à estrutura cognitiva do aluno. Segundo Ausubel,

nossa estrutura cognitiva se organiza, “de forma hierárquica em relação ao nível de abstração, generalização e abrangência das ideias. Distinguem-se dois tipos de aprendizagem subordinativa: a derivativa e a correlativa. Na aprendizagem subordinativa derivativa o material novo de aprendizagem serve de exemplo para um conceito já estabelecido para o estudante, ou seja, esse novo conteúdo é derivado de um conhecimento prévio do aluno, sendo a sua aprendizagem facilitada.” (AUSUBEL, 1968, p.48).

A aprendizagem superordenada se dá quando o raciocínio sobre um conceito mais amplo que fora organizado com o intuito de sintetizar ideias já estabelecidas na estrutura cognitiva é adquirida e a partir desse momento passa a assimilá-los. Esse modelo de aprendizagem exemplifica a “maioria das generalizações que os estudantes aprendem em ciências e matemática” (AUSUBEL, 1978, p.50). No entanto, isso não significa que sejam menos estáveis, possibilitando, assim, outras análises e novas proposições.

Portanto, Ausubel afirma que novos conceitos ou proposições são formados dessa forma, como por exemplo a aprendizagem das relações entre energia e massa que podem ser definidas por meio da física clássica e pela física moderna contemporânea, que propõem novos métodos de relação que levam em consideração aspectos que a física clássica não aborda. Corroborado a essas proposições apresentadas, no próximo capítulo será abordado o contexto histórico implicado na física moderna.

CAPÍTULO 2

2 CONTEXTO HISTÓRICO

2.1 Marcos históricos da Física Moderna e Contemporânea

A física quântica, que surgiu no início do século XX, se diferenciou da física clássica (mecânica newtoniana), que era bem estabelecida como ciência. As descobertas sobre a estrutura atômica constataram que a física clássica era limitada e o que parecia ser óbvio para o clássico era inadmissível para o quântico, como por exemplo, a determinação simultânea e com grande precisão da posição e do momento de uma partícula. Os pesquisadores dividiram-se, pois as ideias novas propostas eram de difícil aceitação por contradizer o senso comum das pessoas naquela época e até mesmo nos dias de hoje (JOAS, 2011).

Segundo Tipler (2006), quando Max Planck apresentou um artigo intitulado “Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal” no dia 14 de dezembro de 1900, foi considerado naquele momento o nascimento da física quântica. Porém, a publicação do artigo não causou muito impacto, pois a comunidade científica ainda estava limitada à física clássica e como o estudo não era bem compreendido, a consequência foi que muitos cientistas contestavam o mesmo (EISBERG e RESNICK, 1979; NUSSENZVEIG, 1997; TIPLER e LLEWELLYN, 2006; TIPLER e MOSCA, 2009).

A partir da mecânica newtoniana imaginava-se que a energia trocada na absorção ou emissão precisaria ser contínua, isto é, a energia proveniente da radiação deveria ser em quantidades infinitesimais. Ao contrário do exposto na física clássica, Planck indicava que essa energia tinha quantidades bem definidas, propondo um modelo teórico em concordância com os experimentos. Ele postulou que essa energia era quantizada e só seria emitida ou absorvida em quantidades definidas (discretizadas). Nascia, então, o conceito de quantum de energia (NUSSENZVEIG, 1997; TIPLER e MOSCA, 2009).

Com uma matemática rebuscada, Max Planck observou uma constante durante seus cálculos, e hoje é a chamada constante fundamental da mecânica quântica, representada pela letra h , denominada constante de Planck. Dentre outras proposições, essa constante significa que a energia emitida pelos corpos irradiados é quantizada e não contínua, como a mecânica newtoniana definia. Planck, desconfortável com os resultados de seus cálculos, revisou-os diversas vezes, mas

obteve os mesmos resultados. Ele acreditou durante muito tempo que seus cálculos estavam incoerentes, mas a veracidade dos mesmos foi constatada no momento em que Planck focou seus estudos na radiação do corpo negro. Sua ideia central era que, ao oscilar com frequência ν , os átomos só poderiam trocar energia em pacotes discretos com magnitude $E = h\nu$ (TIPLER e MOSCA, 2009).

A sua hipótese explica que a troca de energia entre matéria e radiação somente ocorre em pacotes de energia (*quanta*). Partindo desse pressuposto, tem-se que a frequência ν de um oscilador só pode ser gerada se tiver uma incidência de uma energia mínima que seja capaz de provocar a oscilação. Assim, em temperaturas baixas, não há energia necessária que seja capaz de estimular oscilação em frequência alta, não gerando radiação ultravioleta que tenha uma frequência significativa. Desse modo, evita-se o problema da catástrofe do ultravioleta, que a física clássica não soube explicar. De acordo com a física clássica, acreditava-se que um objeto poderia oscilar com qualquer energia, mesmo em temperaturas baixas, o que levaria à catástrofe (TIPLER e MOSCA, 2009).

Desse modo, para obtenção do sucesso de sua hipótese, Planck descartou a ideia da física newtoniana, que considerava que o objeto poderia oscilar com qualquer energia, mesmo em temperaturas baixas, propondo que a energia deve ser transferida em pacotes discretos. Posteriormente, outras evidências foram necessárias para justificar sua hipótese, como por exemplo, o efeito fotoelétrico, que explica quando um metal é iluminado por uma radiação ultravioleta, ejeta elétrons se a frequência está acima de uma frequência-limite que é característica do metal. O efeito fotoelétrico demonstra a natureza corpuscular da radiação eletromagnética (EISBERG e RESNICK, 1979; NUSSENZVEIG, 1997; TIPLER e LLEWELLYN, 2006; TIPLER e MOSCA, 2009).

A radiação estudada por Planck com comportamento corpuscular também foi comprovada por Compton através de experimentos. É importante destacar que o cientista francês Louis De Broglie (1892-1987) defendeu, em sua tese de doutorado, que todas as partículas podem ter comportamento ondulatório. Entretanto, sua proposição na época não podia ser comprovada, devido à falta de tecnologia e de experimentos adequados. É essencial notar que corpos extensos em movimento também têm comportamento ondulatório, só que são desprezíveis (EISBERG e RESNICK, 1979; NUSSENZVEIG, 1997; HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009).

Passados dois anos da teoria de Louis De Broglie, Walter Elsasser (1901-1991) comprovou experimentalmente essa hipótese, com um experimento similar. Utilizando a emissão de um raio eletrônico (feixe de elétrons), Thomson e outros realizaram experimentos que fortaleceram ainda mais essa suposição (EISBERG e RESNICK, 1979; HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009), evidenciando, assim, o experimento de Compton a partir dos resultados interpretados e sugerindo uma natureza corpuscular para o fóton.

Então, comprova-se que a matéria pode se comportar com natureza corpuscular e ondulatória, e surge, então, o termo dualidade onda-partícula. Posteriormente ao amadurecimento de ideias e ao passar dos anos, Niels Bohr, que formulou e defendeu o princípio da complementaridade, em que a natureza corpuscular e ondulatória são complementares entre si e que a detecção de uma ou de outra depende do tipo de experimento, isto é, do tipo de medida. Outros físicos também contribuíram para a dualidade onda-partícula, como Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976) e Max Born (1882-1970). Neste momento surge um tratamento probabilístico, característico da mecânica quântica. A precisão de uma partícula ser encontrada no universo quântico está diretamente ligada a uma distribuição de probabilidades. Surge, então, o princípio da incerteza de Heisenberg (EISBERG e RESNICK, 1979; HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009). Esse princípio foi chamado filosoficamente de Indeterminismo (BACHELARD, 1996).

No final do século XIX, surgiram as primeiras teorias relacionadas às ondas eletromagnéticas de Maxwell. Fazendo uma analogia com a de Schrödinger, pôde-se perceber que o movimento de uma partícula está associado a uma função de onda. É relevante salientar que esses dois cientistas e suas descobertas entraram em concordância e os resultados de ambos eram decorridos de caminhos em parte diferentes. A partir da formulação e da união dessas duas teorias, todos os experimentos feitos ao longo do desenvolvimento científico só ratificaram essa natureza da luz de ser onda-partícula (EISBERG e RESNICK, 1979; HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 2009).

Nessa perspectiva da física moderna, iremos discutir neste trabalho o problema que envolve o interferômetro de Mach-Zehnder com a utilização de um fóton de cada vez, realizando experimentos teóricos, envolvendo interpretações da física e dos cálculos matemáticos.

2.2 A Física Contemporânea no Ensino Médio

A presença da FMC no Ensino médio é foco de estudo desde meados do século XX, de modo que os fundamentos quanto à inserção de elementos da física no ensino básico, assim como as tendências no que tange as propostas de reformulação do currículo foram identificadas.

Dessa maneira, a Lei de Diretrizes e Bases (LDB) nº 9394/96 evidenciou que na estrutura curricular as disciplinas com foco científico têm sido omissas quanto aos avanços observados ao longo dos anos, sendo que foi proposto a inclusão de conteúdos que possibilitem aos alunos diretrizes para desenvolver uma visão de mundo moderno e atualizado. Com isso, surgiu a necessidade de inserir os temas de física moderna. Dessa maneira já aparecia nos documentos oficiais a inserção da FMC no ensino médio (CARNEIRO, 2011).

Para Meneses (2000), a Física Quântica (FQ) no currículo do ensino básico é relevante no período hodierno, tendo um significado cultural, pois integra historicamente a Física Moderna (FM) e as possíveis dificuldades quanto à aprendizagem de conceitos quânticos, sabendo que não são percalços de serem desenvolvidas e trabalhadas no Ensino Médio.

Assim, é pertinente salientar que se faz necessária a inclusão dos conteúdos relativos a FMC para o Ensino Médio. Para tanto, os currículos atuais de ensino no Brasil têm evidenciado a importância da Teoria Quântica. A presença destes conteúdos são mais frequentes nos documentos oficiais, o qual sugerem a inclusão do ensino da FMC no Ensino Médio.

Destarte, nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) destacam-se determinados aspectos da FM como sendo indispensáveis para que os jovens adquiram uma compreensão mais abrangente e permitam construir uma visão sobre como se constitui a matéria, de maneira que tenham contato com novos e diferentes materiais (Brasil, 2002). Com isso, os tópicos relacionados à FC são capazes de promover maior motivação nos discentes, além de estimular seu interesse à medida que estão interligados à compreensão de uma sociedade tecnológica presente em muitos temas do cotidiano, por estar presente na cultura tecnológica atual.

Nesse contexto, percebemos que a educação básica e o ensino de física em específico não têm atraído a atenção de muitos estudantes, ora pela falta de contextualização com o cotidiano, ora por conteúdos considerados antigos, que são

explicitados nos padrões tradicionais. Já para Terrazzan (1992), a FC e suas tecnologias presentes no dia a dia podem oportunizar o conhecimento científico aos estudantes. Seguindo na mesma linha, Ostermann e Moreira (2001) afirmam que a inclusão da FC no ensino médio desperta nos estudantes a curiosidade e promove a aproximação dos mesmos com o mundo da pesquisa em física.

A Física Moderna e Contemporânea (FMC) enfrenta diversas dificuldades no ensino médio, pois muitos professores de física não se sentem seguros quanto ao seu desempenho em ensinar esse tema. Além disso, observamos várias justificativas da não inserção da FMC no ensino médio e diversos depoimentos de professores relatando os empecilhos enfrentados pelos alunos. Esses obstáculos ocorrem na maioria das vezes por uma linguagem matemática abstrata, por uma interpretação equivocada dos conceitos e até mesmo pela ausência de um conhecimento prévio de cálculos básicos, para os quais servem à compreensão dos fenômenos físicos (NARDI, 2009).

No entanto, a falta de um conhecimento prévio do discente não impossibilita a abordagem dos conteúdos de física moderna e contemporânea no ambiente escolar. O fato é que, por meio de um planejamento, é possível que as ideias fundamentais da FMC sejam transformadas em uma aprendizagem significativa. Dessa maneira, o estudo da FMC não tem como pré-requisito um curso minucioso da física clássica para então compreender a FMC, já que a física clássica pode ser tão abstrata e complexa quanto a física moderna e contemporânea. Logo, o ensino da física clássica ou da física quântica podem ser explorados com uma transposição didática que seja bem executada, de modo que seus conceitos e suas aplicações conceda ao aluno um significado para sua formação como cidadão e que não fique só nos conhecidos exercícios tradicionais da física clássica, sendo repetidos na FMC (BROCKINGTON, 2005).

Corroborado a isso, os docentes que necessitem de formação inicial e continuada, ressaltando a importância da atualização do currículo, terão que ser capacitados, e conseqüentemente após a qualificação este profissional será capaz de ensinar tópicos de FMC, e ao entrar em sala de aula, o professor é consciente que ele é um importante agente naquele local que pode de fato inserir tópicos de FMC no EM.

Porém, não é apenas introduzir novos assuntos no ensino de física que vai proporcionar uma análise e estudos de problemas mais atuais. Não havendo uma

preparação adequada dos alunos de licenciaturas nos cursos de graduação, o problema continuará a persistir. Os professores necessitam ser os agentes no processo de transformação curricular, pois serão eles que as implementarão na sua prática pedagógica.

A FQ é tratada muitas vezes por professores do EM como um complexo de abstrações, além disso, acredita-se que o formalismo matemático da física quântica não pode ser trabalhado no Ensino médio, evidenciando que para alguns docentes a FQ é restrita ao formalismo matemático rebuscado. Outra dificuldade enfrentada pelos professores do EM é a carga horária reduzida para um extenso conteúdo de física, a maioria prioriza os conteúdos específicos de vestibulares, e dos conteúdos mínimos dos referenciais curriculares de cada estado. Em uma maioria esmagadora, o conteúdo de FQ não é sequer comentado durante todo o ensino médio (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007).

Os vestibulares e o próprio ENEM não trazem uma abordagem da FMC de forma que o aluno necessite estudar aquele conteúdo obrigatoriamente. Um outro problema é a falta de professores habilitados em física, permitindo que professores de outras áreas atuem na sala de aula. Aliado a tudo isso ainda temos livros didáticos aprovados pelo Ministério da Educação e adotados nas escolas que trazem tópicos de forma muito superficial.

Assim, podemos destacar os seguintes pontos sobre a dificuldade de inserção da FMC no EM, como:

- Abstração dos conceitos;
- Ausência de tópicos de FMC nos exames de vestibulares;
- Carga horária reduzida;
- Conteúdo extenso no EM;
- Insuficiência na formação acadêmica dos professores;
- Falta de materiais nos livros do ensino médio para a elaboração de uma aula que consiga suprir o mínimo de conceitos e da matemática necessária;
- Formalismo matemático da FMC voltada ao EM.

As alternativas sugeridas por Machado e Nardi (2003) sobre a realidade atual das escolas têm como base a reformulação curricular, objetivando aos temas de FMC alguns pontos que são primordiais para uma atualização do currículo, tais

como: Inserção de conceitos de FMC desde o primeiro contato com a disciplina de física, e não apenas no final do último ano da terceira série do ensino médio; Uma carga horária ampliada do ensino de física nas escolas; Investimento em cursos de capacitação e aperfeiçoamento dos professores de física, com foco na FMC; Desenvolvimento das aulas com o auxílio de materiais pedagógicos; Acréscimo do acervo na área de física das bibliotecas; Investimento em laboratórios de física e de informática, permitindo ao aluno ter acesso à Internet e softwares educacionais.

Nesse sentido, o tema FMC agregado à produção de materiais didáticos é fundamental para difundir o acesso tanto para os professores como para os alunos do ensino médio, pois a viabilidade da introdução de conceitos básicos de MQ no EM precisam surgir por meio de abordagens construtivista, a qual promove mudanças conceituais (OSTERMANN e MOREIRA, 2001).

2.3 Interferômetro: contexto histórico

A interferometria se desenvolveu ao longo do século XIX e teve vários desdobramentos para a física no século XX, os quais se tornaram sofisticados e se propagaram consideravelmente, desse modo é pertinente destacar as principais aplicações e evoluções da interferometria até o período hodierno.

Nesse contexto, destaca-se como experimento moderno que tornou-se um marco para a teoria da mecânica quântica, a fenda dupla, em que as fendas são iluminadas por um “feixe” de luz fraca. Assim, pode-se assegurar que não há mais de um fóton por vez atingindo o anteparo por meio das fendas, isso se tornou um dos pontos de destaque para a teoria da mecânica quântica.

Ademais, diversas pesquisas de vanguarda acerca da mecânica quântica fazem uso constante de interferômetros de Mach-Zehnder nos seus experimentos reais e mentais. Assevera-se que o experimento foi possibilitado através da inserção dos novos elementos nas composições interferométricas, tais como os analisadores eletrônicos, as fibras ópticas e os lasers. Nessa perspectiva, Steel (1967, p. 153) ressalta que

Outras versões do interferômetro de Mach-Zehnder surgiram ao longo do século, como o interferômetro de Bates e o alcance das aplicações se multiplicou. Por exemplo, o interferômetro de Mach-Zehnder foi usado em estudos de aerodinâmica em túneis de vento, ou para o estudo de características de plasmas.

O experimento da dupla fenda realizado por Thomas Young, em 1801, pode ser considerado análogo ao experimento do interferômetro. Diversas propostas de experimentos surgiram em sequência, cada um com uma configuração e finalidade diferente, como os interferômetros de Michelson-Morley, Sagnac, Fabry-Perot, Jamin e Mach-Zehnder (JÚNIOR, 2012).

No final do século XIX, imaginava-se que as ondas eletromagnéticas, a exemplo das ondas mecânicas, precisavam de um meio material para se propagarem. Esse meio, onipresente e invisível, foi chamado de éter. Como este meio hipotético nunca fora provado, Michelson (1852-1931) e Morley (1838-1923) realizaram, nos Estados Unidos, uma experiência para verificar sua existência. Eles consideraram que, se o espaço sideral estivesse preenchido pelo éter e a luz propagada por meio dele, sua velocidade seria afetada pela “correnteza do éter”. Porém, quando construíram o interferômetro, capaz de captar variações de até frações de quilômetros por segundo, da velocidade da luz, descobriram que a propagação da luz nas direções perpendicular e paralela à da “correnteza do éter” não altera sua velocidade, fato que invalida a hipótese da existência do éter (NUSSENZVEIG, 1998).

Destarte, a década de 1950 foi marcada pelo desenvolvimento da eletrônica, por meio do método espectroscópico de Michelson, o que resultou na espectroscopia de Fourier, conhecida atualmente, de modo que permite a comparação e a coleta de dados em grandes escalas.

Em meados de 1962, Rosenthal propôs um experimento para medição de grande exatidão envolvendo rotações, como o laser em anel para detectar rotação interferometricamente, denominados interferômetros cíclicos de Sagnac. O método foi realizado efetivamente no ano seguinte por Macek e Davis. Atualmente, giroscópios a laser com base no interferômetro de Sagnac são muito utilizados para navegação de precisão (STEEL, 1967).

Ressalta-se, também, que a interferometria contribuiu para as aplicações em metrologia, como por exemplo, para determinar o metro em termos de linhas espectrais do cádmio. Com o passar dos anos houve uma redefinição do metro em termos de linha do cádmio, aprovado pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas. Atualmente, o metro é definido a partir da função do batimento de lasers estabilizados em frequência (WOLF, 1991).

Como o interferômetro de Mach-Zehnder é semelhante ao arranjo experimental da dupla fenda, estuda-se o comportamento ondulatório da luz. O interferômetro de Mach-Zehnder é um arranjo experimental óptico inventado por Ludwig Mach (1868-1949), filho do teórico Ernest Mach, e pelo físico suíço Ludwig Zehnder (1854-1949), por volta dos anos 1890.

Dentre vários interferômetros, o de Mach-Zehnder não é discutido nos livros disponíveis no ensino médio. O interferômetro permite realizar experimentos de interferência, difração e polarização com um feixe de luz coerente, que é quando as ondas de luz são emitidas com a mesma frequência e direção, mantendo uma relação de fase entre si. Pode-se, também, realizar experimentos de interferência em feixes de intensidade baixíssimas (monofotônicos), em que um fóton de cada vez interage com o interferômetro, podendo ser comprovada teoricamente por meio de cálculos desenvolvidos com operações de matrizes, vetores (ket) que estão apresentados nesta dissertação.

2.4 Interferômetro de Mach-Zehnder

O interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) foi idealizado por Ludwig Zehnder, que se interessava pelo estudo do efeito de variações de pressão sobre o índice de refração da água, sendo proposto pela primeira vez em 1891 e dois anos mais tarde de modo independente por Ludwig Mach, como ferramenta de estudo dinâmico dos gases não estacionários. É denominado como um arranjo experimental parcialmente simples de espelhos e semi-espelhos, o qual evidencia o fenômeno de interferência da luz a partir de um feixe luminoso dividido, como um experimento da fenda dupla.

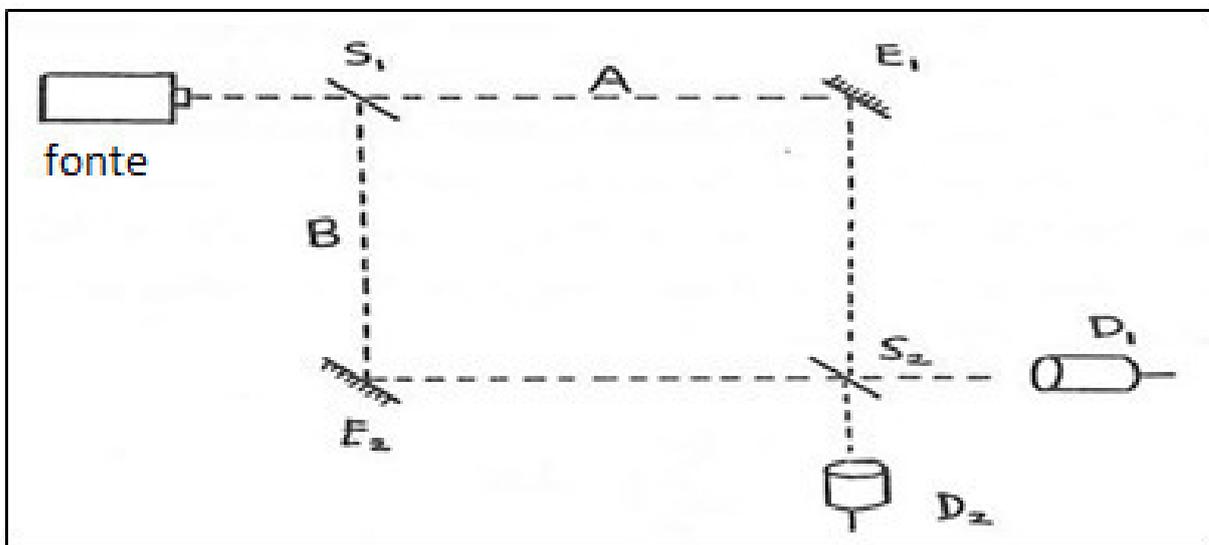
O IMZ é considerado um dispositivo simples, objetivando demonstrar o fenômeno da interferência a partir da divisão de amplitude. Desta maneira, no tocante a essa divisão, Zetie (2000, p. 48) explicita que

Um feixe de luz é dividido primeiramente em duas partes por um divisor de feixe e, em seguida recombinados por um segundo divisor de feixe. Assim, dependendo da fase relativa adquirida pelo feixe ao longo dos dois caminhos o segundo divisor de feixe refletirá o feixe com eficiência entre uma porcentagem de 0 e 100.

Nesse sentido, o feixe luminoso é composto de ondas monocromáticas com comprimento de onda λ , divide-se em um semiespelho e é recombinado em um segundo semi-espelho, de modo que mostrará a interferência construtiva a partir da

fase relativa dos feixes ao longo dos caminhos. A Fig. 1 ilustra o interferômetro de Mach-Zehnder.

Figura 1 – Imagem do interferômetro de Mach-Zehnder



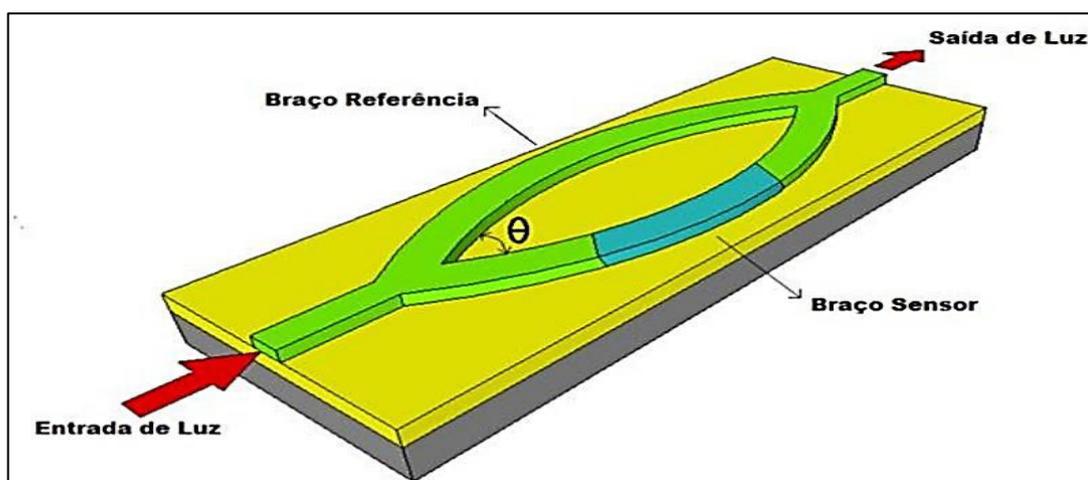
Fonte: “adaptado de” Prado (2006).

- S_1 primeiro espelho semitransparente.
- S_2 segundo espelho semitransparente.
- E_1 e E_2 são os espelhos de reflexão total.
- D_1 e D_2 são os detectores do interferômetro.

Dessa maneira, os espelhos E_1 e E_2 refletem 100%, os semiespelhos S_1 e S_2 transmitem e refletem 50% da luz em cada “braço” (percurso) do interferômetro. No que tange ao seu funcionamento, o IMZ pode ser usado em vários conceitos e interpretações inerentes à MQ, como o fenômeno da interferência, o princípio da incerteza e a dualidade onda-partícula (NOVAIS, 2016).

O IMZ possui como princípio de funcionamento a separação de um feixe de luz por meio de “braços” em formato de Y. Os feixes se dividem e se reúnem em Y de forma simétrica, sendo conduzidos pela junção dos “braços” na saída, conforme ilustrado na estrutura de um IMZ, representado na Fig. 2.

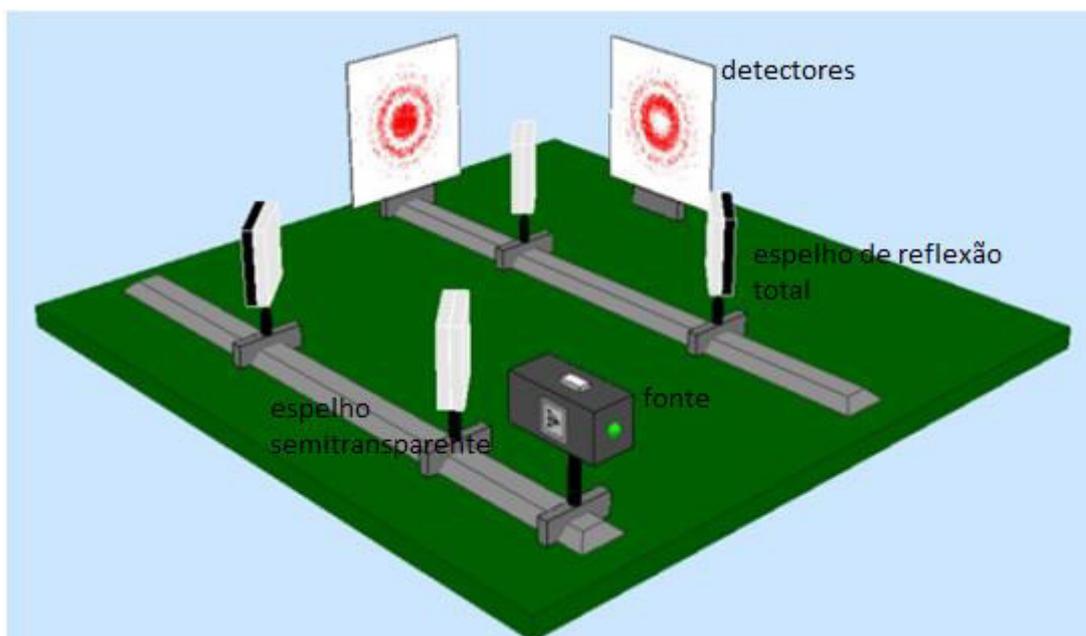
Figura 2 – Estrutura do IMZ



Fonte: Camilo (2014).

Contudo, o IMZ é um excelente exemplo de dispositivo que gera interferência óptica por meio de divisão de amplitude. Desse modo, são diversas as possibilidades oferecidas como recurso didático no que tange aos conceitos de dualidade onda-partícula no estudo da FQ, o qual inserem-se no ensino.

Em relação ao IMZ quântico, infere-se que em meados da década de 1980, por meio dos avanços tecnológicos, o uso de fontes que funcionam com baixa intensidade luminosa foram facilitados. Dessa maneira, para que um experimento clássico seja convertido em experimento quântico é preciso ajustar, a priori, a fonte luminosa, reduzindo a intensidade do feixe, ajustando a fonte de modo que ela possa emitir um fóton de cada vez. É necessário, também, o uso de detectores de fótons. Para melhor exemplificar, a Fig. 3 representa o IMZ no regime quântico.

Figura 3 – IMZ no regime quântico

Fonte: “adaptado de” Ostermann e Prado (2005)

Assim, por meio desses mecanismos, o interferômetro funcionará no regime quântico, com natureza corpuscular. Pode-se analisar que, ao se considerar apenas os fótons presentes em um dos detectores, estimava-se que estes fossem coletados de modo igual, ou seja, 50% para cada um dos detectores. No entanto, todos os fótons são detectados em somente um dos detectores, pois em um deles ocorre a interferência construtiva, e no outro destrutiva. Com isso, dependendo de qual estado o fóton se inicia no IMZ, ao passar pelos espelhos semitransparente e de reflexão total, somente um dos detectores irá clicar (considerando o caso sem objeto obstruindo um dos caminhos).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Nesta etapa da dissertação apresentamos a construção de uma sequência didática contendo os tópicos necessários para inserção de conceitos de mecânica quântica na Física do Ensino Médio. Efetuaremos experiências teóricas com uma análise qualitativa e uma descrição minuciosa de cada um dos tópicos, podendo ser até mesmo um instrumento de investigação de aprendizagem dos discentes diante da introdução de novos conceitos.

O produto educacional foi aplicado no Colégio Estadual Guilherme Dourado, localizado na cidade de Araguaína, Estado do Tocantins. A aplicação, onde o autor leciona, foi nas aulas da disciplina de Física para uma turma formada por alunos interessados no tema, sendo que todos estes discentes são da terceira série do ensino médio.

3. AS FASES DA PESQUISA

O termo “experimentação teórica” foi utilizado com o significado de se aplicar conteúdos específicos por meio de transposição didática.

1ª FASE: Utilização de experimentações teóricas com aplicação da aprendizagem mecânica. Além disso, foi realizada pesquisa nos livros didáticos do ensino médio que abordam tópicos de física quântica. Observamos que apenas o interferômetro de Michelson-Morley é abordado de forma sucinta.

2ª FASE: De acordo com a aprendizagem significativa de Ausubel, a aplicação de um questionário como uma metodologia de identificação dos conhecimentos já existentes na estrutura cognitiva dos alunos possibilita uma ligação na construção de novas informações. Os conhecimentos prévios dos discentes sobre conceitos de interferência, números complexos, matrizes, estados vetoriais quânticos e a mecânica quântica em geral serão objetos deste questionário, como uma avaliação diagnóstica. Porém, não se busca no mesmo, respostas corretas, a intenção é

identificar os conhecimentos adquiridos durante a vida de cada aluno. Este questionário se encontra no Apêndice A.

3ª FASE: Destinada à elaboração do produto educacional. Aqui, foram descritos os fundamentos teóricos das medições livres de interação do interferômetro de Mach-Zehnder e suas aplicações. Mais detalhes sobre este material serão apresentados no próximo capítulo.

4ª FASE: Aplicação do produto educacional (localizado no apêndice B) com duração de 300 minutos. As aulas foram ministradas com o auxílio de vídeos e projetor multimídia (*data-show*) em conjunto com cálculos matemáticos envolvendo demonstrações teóricas, com a utilização dos conteúdos do ensino médio de matemática e física, sendo os alunos instigados a demonstrar suas competências e habilidades sobre o tema apresentado.

5ª FASE: O questionário aplicado na segunda fase e reaplicado nesta fase tem como objetivo verificar as distinções nas respostas dos alunos neste período de estudo de alguns tópicos da mecânica quântica abordados durante a aplicação do produto.

6ª FASE: Verificação se a aprendizagem mecânica inicialmente aplicada aos alunos que nunca estudaram mecânica quântica se tornaram significativa, analisando cada ponto da aplicação do produto e buscando evidências que permitam classificar e avaliar o material proposto como potencialmente significativo.

3.1 Resumo de cada uma das seis aulas ministradas

As aulas ministradas tiveram duração total de 300 minutos, sendo cada aula com 50 minutos. Todas foram ministradas pelo autor do trabalho. A escola estadual Guilherme Dourado possui quatro turmas do terceiro ano do ensino médio no turno matutino, sendo um total de 151 alunos matriculados. As aulas foram disponibilizadas para todos, mais um total de 28 alunos ficaram interessados pelo tema proposto. E a partir deste quantitativo, as aulas foram realizadas.

1ª AULA: Exibimos a proposta detalhada sobre tópicos da mecânica quântica para os alunos que aceitaram participar da aplicação do produto. Neste momento, aplicou-se um questionário que se localiza no Apêndice A, sendo este necessário para identificarmos os conhecimentos preexistentes dos estudantes. Na sétima questão foram apresentados vídeos sobre o interferômetro de Mach-Zehnder.

2ª AULA: O tema de ondulatória foi revisado de maneira geral e direcionado para o fenômeno da interferência, pois além de falarmos sobre os conceitos básicos de ondulatória, colocamos como foco principal o fenômeno da interferência construtiva e destrutiva. Além disso, revisamos os conteúdos de números complexos e matrizes. Os espaços vetoriais da mecânica quântica também foram abordados, mas como um tópico novo para os discentes.

3ª AULA: Abordamos o experimento da dupla fenda fazendo analogia com o interferômetro de Mach-Zehnder. Sabe-se que existe um comportamento dual no experimento da dupla fenda de maneira que é semelhante ao interferômetro. Neste momento, os alunos começam a associar o fóton com as ondas de luz, de modo que conseguem transpor a barreira do clássico e chegar ao mundo quântico.

4ª AULA: Esta aula teve como objetivo proporcionar uma discussão e instrução sobre as medições livres de interação do interferômetro de Mach-Zehnder SEM objeto (macroscópico) obstruindo um dos caminhos. Desse modo, efetiva-se o desenvolvimento de um tópico da física teórica contendo todos os passos matemáticos realizados durante a passagem do fóton no interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), desde o primeiro espelho até o colapso em um dos detectores.

5ª AULA: Depois de explicado o experimento teórico SEM objeto obstruindo um dos caminhos, nesta aula fizemos os cálculos matemáticos COM um objeto obstruindo um dos “braços” do interferômetro, destacando a diferença entre as medições livres de interação e o interferômetro de Mach-Zehnder.

Ao se aproximar do final da aula, o professor fez algumas considerações sobre o decurso do experimento, observando as colocações pertinentes dos alunos

de forma individual ou em grupo, colaborando desta forma com as propostas apresentadas pelo professor.

6ª AULA: Na última aula foi aplicado o mesmo questionário apresentado no Apêndice A e, posteriormente, o questionário da sequência didática localizado no Apêndice C, mais complexo do que o primeiro. O objetivo foi analisar as respostas após a aplicação do produto desde os conhecimentos já existentes até os aprendidos por meio de uma aprendizagem mecânica que se tornou significativa. Dentro desta mesma aula avaliamos a evolução da turma quanto ao tema desenvolvido ao longo destas seis aulas por meio de discussões entre quatro grupos de sete pessoas.

3.2. O Produto Educacional

O material produzido é constituído por uma sequência didática contendo tópicos de mecânica quântica e experimentações teóricas baseadas em cálculos matemáticos envolvendo conceitos e definições da física. O que temos de diferente nessa proposta é a utilização de métodos matemático-físicos completamente novos para os estudantes do ensino médio, no sentido de demonstrar de forma detalhada a temática do interferômetro de Mach-Zehnder. Sabemos que a maioria dos livros didáticos do ensino médio omitem até mesmo o conhecido interferômetro de Michelson-Morley. Levando em consideração as lacunas apresentadas em relação à forma de expor o conteúdo ou até mesmo a falta deste nos livros didáticos, o produto educacional busca trazer reflexões sobre como abordar de maneira inicial o aluno para motivá-lo em relação à mecânica quântica e, em específico, ao tema do interferômetro. Para melhor compreensão e motivação, discutiremos brevemente alguns fatos históricos que acarretaram na formulação da mecânica quântica.

De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN, 1998) a “física como parte integrante da cultura contemporânea” permite a formação cidadã adequada para compreender as atividades tecnológicas envolvidas no dia a dia. Logo, este produto educacional busca proporcionar aos discentes do ensino médio informações que facilitem o conhecimento dos princípios da física quântica e que tenha competência e habilidade de associar os conteúdos estudados com as

tecnologias do seu cotidiano. Em seguida, mostraremos todas as etapas do material e detalharemos aquilo que for mais relevante.

Na primeira seção do produto educacional inserimos tópicos da mecânica quântica destacando as formulações fundamentais da física na escala atômica e subatômica. Sabendo que estamos falando em escalas microscópicas e fazendo uma analogia com escalas macroscópicas, verificamos que a física quântica não pode ser completamente derivada a partir da física clássica, pois se uma partícula tem seu estado bem definido pela sua posição e seu momento, é possível prever, em um determinado instante, os resultados de qualquer medida realizada sobre ela. Já na MQ, para o fóton e outras partículas, não é possível prever com certeza o resultado de qualquer medida realizada sobre elas. O que se obtém são probabilidades da medida fornecer os valores possíveis para as grandezas relevantes.

A primeira formulação sólida da mecânica quântica foi denominada mecânica matricial. A formulação ondulatória de Erwin Schrödinger (1887-1961) foi criada em 1926 (Nobel de Física em 1933) e tem como base uma equação que descreve como o estado quântico de um sistema físico evolui no tempo, distinguindo da formulação matricial por utilizar a forma diferencial.

A mecânica quântica desenvolvida por Paul Dirac (1902-1984) estabelece que o espaço físico é representado por um vetor de estado em um espaço vetorial complexo, onde esse vetor pode ser representado por uma matriz coluna dado por “ket de alfa”, $|\alpha\rangle$. O conhecido vetor do ensino médio será substituído agora por vetores de estado quântico, onde o estado físico tem um significado e as probabilidades podem ser calculadas a partir deles. Sendo assim, postula-se que o ket contém a informação sobre o estado físico do sistema em estudo.

Em um segundo momento da sequência didática falamos de maneira resumida sobre os conteúdos do ensino médio até os conceitos de física moderna. A interferência representada pela superposição de ondas em uma região do espaço está ligada diretamente ao cotidiano do estudante do ensino médio por meio das interferências construtiva e destrutiva. Além disso, também constam tópicos sobre o fenômeno das franjas de interferências claras e escuras, objetivando a conexão entre o que ocorre nos regimes clássico e quântico, já que o colapso do fóton em um dos detectores do interferômetro caracteriza a interferência construtiva, isto é, franjas claras no anteparo.

O IMZ descreve o fóton seguindo dois caminhos distintos simultaneamente. No modelo clássico, o fóton é uma partícula de luz indivisível que pode ser refletido ou transmitido em um espelho semitransparente. Na linguagem quântica, dizemos que o fóton está em um estado de superposição quântica.

O interferômetro de Mach-Zehnder foi criado por Ludwig Mach ainda no século XIX e pelo físico suíço Ludwig Zehnder, por volta dos anos 1890. O interferômetro é um experimento que faz uso do fenômeno de interferência entre as ondas de luz, ou um meio de comprovar que a luz possui propriedades ondulatórias. Interferômetros são aparelhos que dividem um feixe de luz em dois, reunindo os dois feixes resultantes depois que cada um deles percorre um dos caminhos do equipamento. O experimento da dupla fenda, realizado por Thomas Young em 1801, pode ser considerado o primeiro interferômetro.

Os interferômetros possuem uma sensibilidade capaz de detectar diferentes comprimentos de onda do objeto quântico e ainda podem ser extremamente precisos, úteis para navegação interestelar, para a medida de constantes fundamentais e para aplicações em prospecção geológica e mineral. Por exemplo, esse tipo de interferômetro permitiria a medida do campo gravitacional na superfície da Terra com precisão suficiente para detectar poços de petróleo.

Em um terceiro momento discutiu-se um breve resumo dos números complexos e suas aplicabilidades na MQ, definindo-o como um vetor que contém um par ordenado de valores. No plano dos números complexos, existem as partes real e imaginária. Então, os números complexos que chamamos de z , são representados por $z = a + bi$, a é a parte real e b a parte imaginária. Esta notação é chamada de forma algébrica. Nesse momento discutiremos por que usar números complexos na mecânica quântica. Podemos justificar de forma mais didática aos alunos do ensino médio, apontando que as propriedades dos números complexos conseguem modelar em nível básico os fenômenos da mecânica quântica.

Na seção 4 mostramos um resumo sobre matrizes e exemplos conhecidos no cotidiano escolar do estudante do ensino médio. As operações com matrizes são primordiais, pois a MQ opera com cálculos de matrizes. Cada espelho é representado por uma matriz quadrada que opera com o estado do fóton, representado por uma matriz coluna, desenvolvendo assim os experimentos teóricos desejados. Dessa maneira, busca-se um entendimento da mecânica quântica matricial em uma linguagem acessível aos alunos secundaristas.

No quinto tópico da sequência didática destacamos os espaços vetoriais na mecânica quântica, onde mostramos que os espaços vetoriais são, geralmente, de dimensões infinitas e são então chamados de espaços de Hilbert, em homenagem ao matemático alemão David Hilbert (1862-1943).

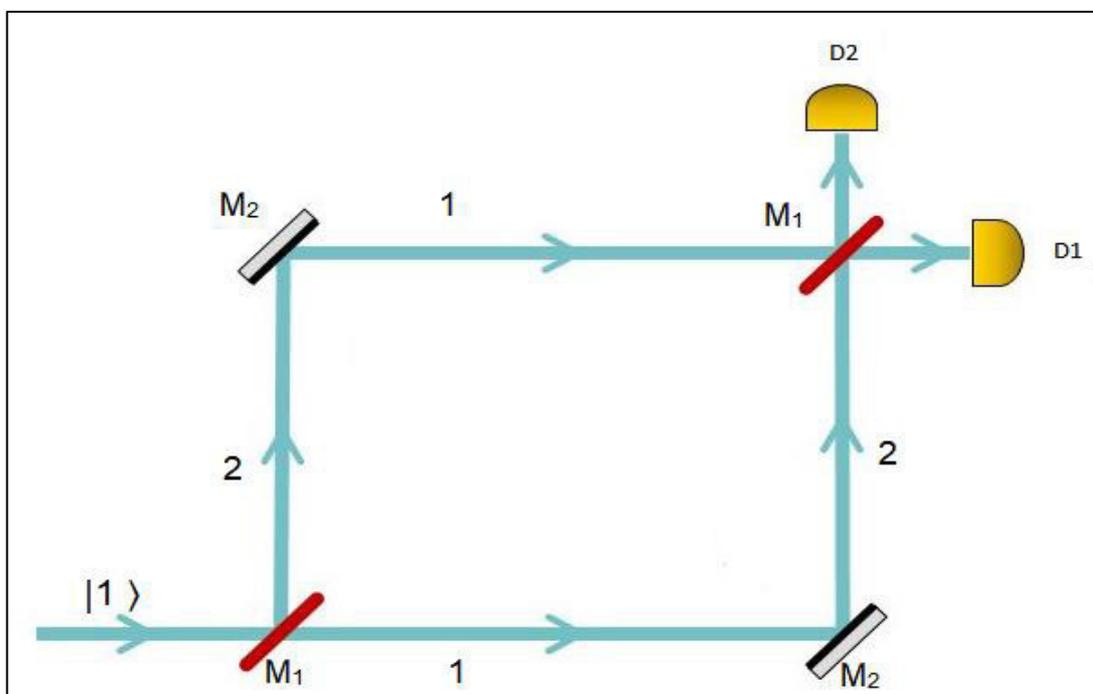
Na mecânica quântica, representamos geralmente os vetores pelos símbolos bra $\langle |$ ou ket $| \rangle$, inventados por Paul Dirac, sabendo que o postulado fundamental da mecânica quântica diz que o estado de um sistema quântico é matematicamente representado por um ket normalizado $|\alpha\rangle$.

As próximas duas subseções do produto seguem um padrão de entendimento parecido quanto à presença ou não do objeto clássico obstruindo um dos caminhos do fóton.

3. 2. 1 Medições livres de interação sem objeto

Na Fig. 4, temos o experimento das medições livres de interação do Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) SEM objeto obstruindo um dos caminhos.

Figura 4 – Interferômetro de Mach-Zehnder SEM objeto



Fonte: “adaptado de” Müller (2002, p. 203).

- M_1 = espelhos semi-transparentes (refletem e transmitem 50%).
- M_2 = espelhos (refletem 100%).
- $|1\rangle$ = estado do fóton movendo-se para a direita.
- $|2\rangle$ = estado de um fóton movendo-se para cima.

O Interferômetro de Mach-Zehnder é composto por dois espelhos semitransparentes M_1 (que transmitem e refletem 50% do feixe incidente), outros dois espelhos de reflexão total M_2 e dois detectores D_1 e D_2 . De acordo com o objetivo do experimento, as distâncias entre os espelhos podem ser ajustadas, porém a precisão dos espelhos alinhados deve seguir com um ângulo de incidência de 45° (ELITZUR, 1993).

Apresentamos a seguir, por meio de cálculos matemáticos, o experimento teórico do Interferômetro de Mach-Zehnder SEM objeto obstruindo um dos braços do IMZ. Neste caso, foi escolhido o estado do fóton inicial $|1\rangle$.

A matriz referente à operação do espelho semitransparente M_1 é dada por

$$M_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Os estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$ do fóton são representados pelas seguintes matrizes coluna:

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$|2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Quando estudamos mecânica quântica, operamos com cálculo de matrizes. O produto de uma matriz quadrada que representa o espelho semitransparente M_1 , com uma matriz coluna que representa o estado do fóton $|1\rangle$, é dado por:

$$M_1|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Expandindo o resultado da equação (4) por meio das matrizes colunas dos estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$, obtemos

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right].$$

Assim, chegamos na seguinte superposição:

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i |2\rangle \}. \quad (5)$$

A equação (5) significa a superposição do estado do fóton $|1\rangle$, no primeiro espelho semitransparente M_1 . Multiplicando a matriz do primeiro espelho semitransparente M_1 , equação (1), com a matriz coluna do estado do fóton $|2\rangle$ equação (3), temos

$$M_1 |2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

De acordo com o resultado da equação (6), obtemos a seguinte superposição

$$|2\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ i |1\rangle + |2\rangle \}. \quad (7)$$

A matriz que opera no espelho de reflexão total M_2 é representada por

$$M_2 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Multiplicando a matriz M_2 equação (8) com o resultado do produto da matriz M_1 com o estado do fóton $|1\rangle$ equação (4), obtemos o resultado:

$$M_2 \cdot (M_1 |1\rangle) = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Assim, a superposição do estado $|1\rangle$, após o primeiro espelho semitransparente M_1 e o espelho de reflexão total M_2 , é dado por

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}}\{|1\rangle + i|2\rangle\} \xrightarrow{M_2} \frac{1}{\sqrt{2}}\{-|1\rangle + i|2\rangle\}. \quad (10)$$

Após o estado inicial do fóton $|1\rangle$ percorrer os dois espelhos (o primeiro espelho semitransparente M_1 e o espelho de reflexão total M_2), foi aplicado finalmente o segundo espelho semitransparente M_1 no resultado da equação (9). Portanto, após a realização dos cálculos matemáticos obteve-se o resultado a seguir:

$$M_1 \cdot (M_2 \cdot M_1|1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Assim, o resultado do caminho do fóton em todo o processo do interferômetro é obtido pelas superposições:

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}}\{|1\rangle + i|2\rangle\} \xrightarrow{M_2} \frac{1}{\sqrt{2}}\{-|1\rangle + i|2\rangle\} \xrightarrow{M_1} -|1\rangle. \quad (12)$$

O fato de que no resultado final somente o detector D_1 clicar, comprova que a escolha do estado do fóton inicial foi $|1\rangle$, afirmado antes do início do experimento teórico.

Dependendo de como o experimento teórico é realizado, seja com estado do fóton inicial $|1\rangle$ ou $|2\rangle$, ocorrerá no final do processo o colapso em um dos detectores, sendo possível afirmar que haverá interferência construtiva em um dos detectores e destrutiva no outro. Neste caso, obtendo como resultado final dos cálculos o estado do fóton $-|1\rangle$, a interferência é construtiva no detector D_1 e destrutiva no detector D_2 .

Alguns significados são importantes serem apresentados, por exemplo, o que significa colapsar, e se o sinal negativo no resultado final do experimento teórico tem alguma influência. Respondendo a primeira indagação, colapsar significa entre as várias probabilidades de estado que o objeto tem, somente um é medido. E quanto a

segunda indagação, o sinal negativo no estado do fóton $-|1\rangle$: este não afeta o resultado, porque a amplitude quando é calculada a sua probabilidade é elevada ao quadrado, então é só um fator de fase da onda e não altera a probabilidade.

Realizando uma analogia quanto ao comportamento dos detectores D_1 e D_2 , estes tendo um comportamento ondulatório da luz, são substituídos por anteparos. Porém, quando o comportamento é corpuscular, os detectores são fundamentalmente contadores de fótons.

Se multiplicarmos as três matrizes que operam no IMZ, obtemos uma matriz H como resultado:

$$H = M_1 \cdot M_2 \cdot M_1,$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix},$$

$$H = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & i \\ i & -1 \end{pmatrix},$$

$$H = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 - 1 & i - i \\ -i + i & -1 - 1 \end{pmatrix},$$

$$H = - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$H|1\rangle = -|1\rangle.$$

Aplicando H no estado do fóton $|1\rangle$, e fazendo a combinação de todas as matrizes dos espelhos do IMZ, a matriz obtida no resultado final é uma matriz identidade negativa, e o estado do fóton final também é negativo. Observamos, assim, o mesmo resultado calculado no experimento teórico do IMZ.

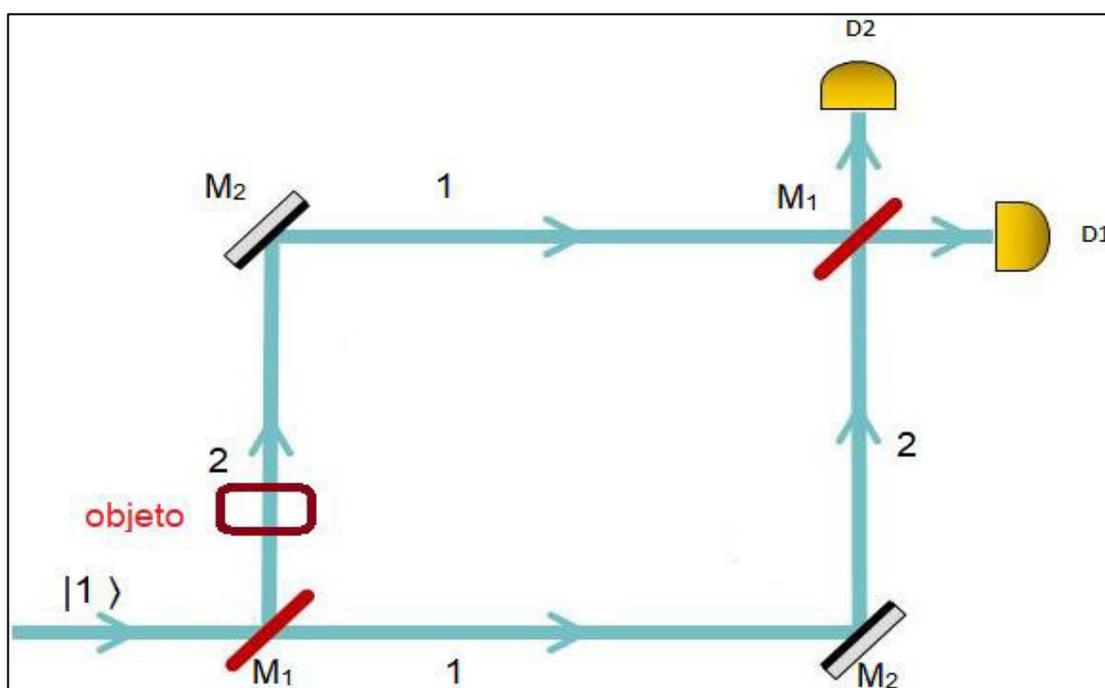
3. 2. 2 Medições Livres de Interação com objeto

As medições livres de interação no interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ) COM objeto obstruindo um dos caminhos se diferencia do caso SEM objeto, pois o

fóton é espalhado (ou absorvido) por um objeto macroscópico (um anteparo por exemplo). Além disso, observa-se que diante do resultado final da superposição no caso COM objeto, D_2 clica, isto é, colapsa em $|2\rangle$, garantindo que temos um objeto clássico obstruindo um dos caminhos, SEM interagir com ele, pois no caso da ausência do objeto, D_2 nunca clicava, por causa da interferência destrutiva propositalmente configurada em D_2 .

Na Fig. 5, temos o experimento das medições livres de interação COM um objeto obstruindo um dos caminhos.

Figura 5 – Interferômetro COM objeto obstruindo um dos caminhos



Fonte: “adaptado de” Müller (2002, p. 203).

Da maneira que o experimento é realizado, o estado do fóton $|1\rangle$, após este incidir e refletir no primeiro espelho semitransparente, observamos que o estado do fóton é obstruído no caminho em que há o objeto. Em outras palavras, temos a seguinte transformação:

$$|2\rangle \rightarrow |\text{espalhado}\rangle. \quad (13)$$

Apresentamos, a seguir, por meio de cálculos matemáticos, o experimento teórico do IMZ com objeto obstruindo um dos caminhos. Neste caso, foi escolhido o estado do fóton inicial $|1\rangle$.

Sabendo que o produto da matriz pelo estado do fóton $M_1|1\rangle$ equação (4) é representado por

$$M_1 |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (14)$$

E a superposição formada pelo estado do fóton $|1\rangle$, equação (5), é dado por

$$|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i |2\rangle \}. \quad (15)$$

Multiplicando a matriz M_2 , equação (8), com a matriz coluna do estado do fóton $|1\rangle$, equação (2), obtemos a seguinte matriz:

$$M_2 |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix} = i \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

A superposição do estado $|1\rangle$, após o espelho de reflexão total M_2 , apresenta a seguinte transformação:

$$|1\rangle \rightarrow i |2\rangle. \quad (17)$$

Substituindo a equação (13) e (17) na equação (15), obtemos como resultado a equação (18). Representando o estado do fóton $|1\rangle$ após passar pelo espelho de reflexão total M_2 , assim, temos as substituições e o resultado a seguir:

$$|1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i |2\rangle \},$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \{ i |2\rangle + i |\text{espalhado}\} = \frac{i}{\sqrt{2}} \{ |2\rangle + |\text{espalhado}\}. \quad (18)$$

Reescrevendo (6) em (19),

$$M_1|2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

E reescrevendo, também, (7) em (20),

$$|2\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{i|1\rangle + |2\rangle\}. \quad (20)$$

Assim, aplicando a propriedade distributiva na equação (20), teremos:

$$|2\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{i|1\rangle + |2\rangle\},$$

$$|2\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} i|1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |2\rangle. \quad (21)$$

Substituindo (21) em (18), temos como resultado

$$\frac{i}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{i}{\sqrt{2}} |1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |2\rangle + |\text{espalhado}\rangle \right\} = -\frac{1}{2} |1\rangle + \frac{i}{2} |2\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}} |\text{espalhado}\rangle. \quad (22)$$

Resumindo, temos a seguinte transformação

$$\text{após o primeiro espelho semitransparente } M_1 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \{|1\rangle + i|2\rangle\}.$$

Em seguida, temos a matriz M_2 que opera no objeto gerando a superposição

$$\text{após os dois espelhos } M_2 \rightarrow \frac{i}{\sqrt{2}} \{|2\rangle + i|\text{espalhado}\rangle\}.$$

Por fim, operando no segundo espelho semitransparente M_1 , obtemos o resultado do processo do IMZ com objeto obstruindo um dos caminhos

após o segundo espelho $M_1 \rightarrow -\frac{1}{2}|1\rangle + \frac{i}{2}|2\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}}|\text{espalhado}\rangle$. (23)

Realizando, na equação (23), o cálculo das probabilidades dos estados $|1\rangle$, $|2\rangle$ e $|\text{espalhado}\rangle$ por meio do quadrado de suas amplitudes, obtemos para o estado $|1\rangle$, a probabilidade

$$P_1 = \left(-\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4},$$

correspondendo a um percentual de 25%.

Para o estado $|2\rangle$, temos a probabilidade

$$P_2 = \left(\frac{i}{2}\right)^2 = \frac{1}{4},$$

correspondendo a um percentual de 25%.

Para o estado $|\text{espalhado}\rangle$, temos a probabilidade

$$P_e = \left(\frac{i}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2},$$

correspondendo a um percentual de 50%.

Nas medições livres de interação com objeto obstruindo um dos caminhos, observa-se pelas probabilidades que D_2 clica, isto é, colapsa em $|2\rangle$, significa que podemos garantir que existe um objeto clássico obstruindo um dos caminhos sem interagir com ele, pois no caso sem o objeto, D_2 nunca clicava. No caso do fóton espalhado por um dos caminhos nenhum detector irá clicar. Observamos, também, que o estado do fóton $|1\rangle$, a medição não foi bem sucedida, pois o fóton poderia ter atingido D_1 com ou sem a presença do objeto que está localizado em um dos caminhos. Neste caso, não houve interação com o objeto.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS DADOS

4. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante a aplicação do material didático proposto foram apresentadas aos estudantes as análises e resultados referentes à sequência de aulas ministradas desde alguns pré-requisitos de física quântica até as medições livres de interação do interferômetro de Mach-Zehnder. Desse modo, foi proposto antes do início do produto educacional a aplicação de um questionário localizado no (Apêndice A), o qual é apresentado aos alunos algumas situações problemas, e um outro questionário ao final da aplicação do produto no (apêndice C).

A partir dessa problemática, buscou-se averiguar os conhecimentos preexistentes dos discentes em relação aos conteúdos que foram trabalhados no decorrer das aulas. Os questionários formulados têm o objetivo de despertar o interesse dos alunos, provocando respostas diferentes dos temas trabalhados no ensino médio e hipóteses das mais variadas.

A pesquisa proposta tem uma característica qualitativa, mas também utilizaremos o caráter quantitativo na análise das questões. Durante a implementação do produto didático e da sua aplicação por meio de questionários e observações em sala de aula, acompanhamos os desenvolvimentos conceituais dos alunos na compreensão de tópicos e fenômenos da física quântica.

No primeiro questionário, utilizamos questões objetivas, pois a mecânica quântica é complexa para os alunos elaborarem respostas discursivas e, portanto, perguntas objetivas são adequadas para esse tipo de avaliação, conseqüentemente facilitando a análise dos resultados. Em um segundo questionário, elaboramos perguntas mais direcionadas à sequência didática, nesse caso utilizamos perguntas objetivas e subjetivas sendo assim possível ao estudante expor sua opinião.

Desse modo, os resultados foram apresentados em forma de gráficos, mostrando respectivamente análises antes e após a aplicação do produto educacional.

4.1 Aplicação do questionário apresentado no Apêndice A

A seguir apresentamos cada uma das questões que estão no apêndice A, para facilitar a leitura dessa seção, prosseguindo com a subsequente análise dos resultados obtidos.

Questão 1. De acordo com o desenvolvimento dos conteúdos da primeira série do ensino médio, a partícula pode também, ser chamada de:

- a) Corpúsculo
- b) Um objeto muito pequeno
- c) Um grão de areia

Na primeira questão, a quantidade de alunos da primeira série do ensino médio que entenderam o sentido da palavra “partícula” da mecânica newtoniana como “corpúsculo” é mostrada nas Figs. 6 e 7, antes e após os questionários serem aplicados. Lembrando que 28 alunos participaram da aplicação do produto educacional. Assim, as abscissas dos gráficos representam, respectivamente, as alternativas em ordem alfabética.

Figura 6 – Resultado da questão 1 antes da aplicação do produto

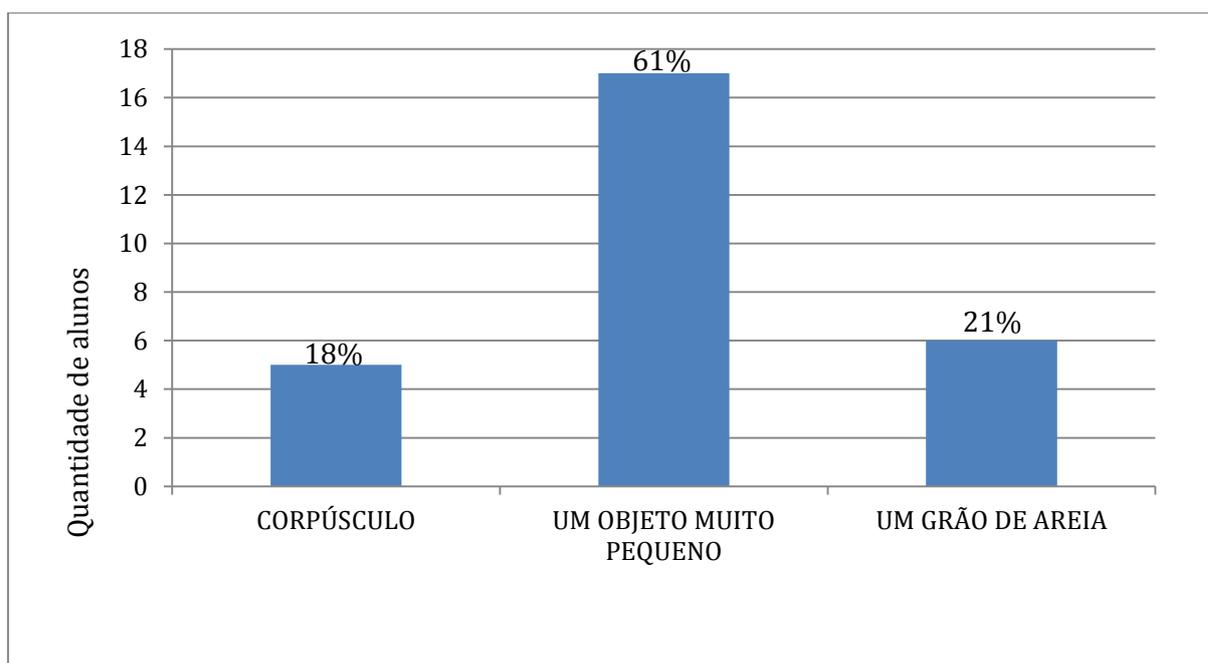
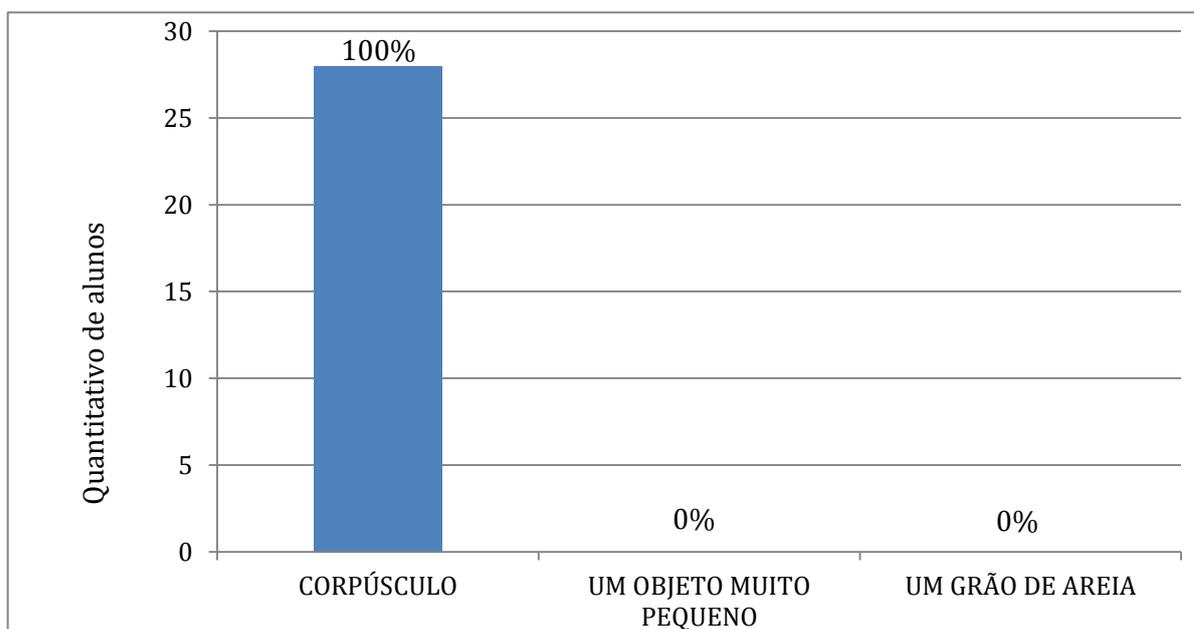


Figura 7 – Resultado da questão 1 depois da aplicação do produto

No questionário (apêndice A), aplicado antes da explicação do produto, aproximadamente 18% dos alunos associaram partícula ao significado de corpúsculo, enquanto 61% marcou a alternativa B (um objeto muito pequeno), e 21% optaram pela letra C (um grão de areia). Depois de explicado o produto, todos os alunos lembraram ou aprenderam o significado da primeira questão, demonstrando uma evolução do resultado após a aplicação do produto educacional durante as 6 aulas ministradas.

Questão 2. Em algum momento da sua vida de estudante, você ouviu falar em Mecânica Quântica?

- a) sim
- b) não

Na segunda questão, seguindo com análise, do gráfico da Fig. 8, aproximadamente 39% dos alunos afirmaram que já tinham ouvido algo sobre mecânica quântica, enquanto os outros 61% desconheciam completamente. Evidentemente, depois de aplicado o produto, como mostra a Fig. 9, 100% dos alunos afirmaram que já conheciam sobre MQ, este resultado já era esperado, pois no decorrer da aplicação do produto educacional observamos os alunos relacionando o tema com as diversas utilidades dos objetos utilizados no dia a dia,

como, por exemplo: celulares, computadores e chips. Incluímos essa pergunta no questionário com o intuito de arguir se o aluno teve consciência de que o conteúdo apresentado fazia parte de uma área da ciência denominada mecânica quântica.

Analisando a resposta da segunda questão antes da exposição do produto educacional, é evidente uma atualização curricular urgente, uma vez que, este eixo contempla avanços tecnológicos que são relevantes para a vivência e bem estar da sociedade, como por exemplo: as recentes descobertas na área de informação quântica que permitiu desenvolvimento de computadores, tablets, GPS, satélites, naves espaciais, aviões, radares que os alunos não tinham a apropriação de como associar esses exemplos.

De acordo com a Revisão Bibliográfica de Moreira (2000), a necessidade de uma atualização curricular da disciplina de física se faz urgente, pois, infelizmente, constata-se que as escolas estão ensinando majoritariamente voltado para um treinamento dos vestibulares. Ponderamos que as experimentações teóricas possam contribuir para as mudanças no ensino dos estudantes ao se deparar com uma física contemporânea.

Figura 8 - Resultado da questão 2 antes da aplicação do produto

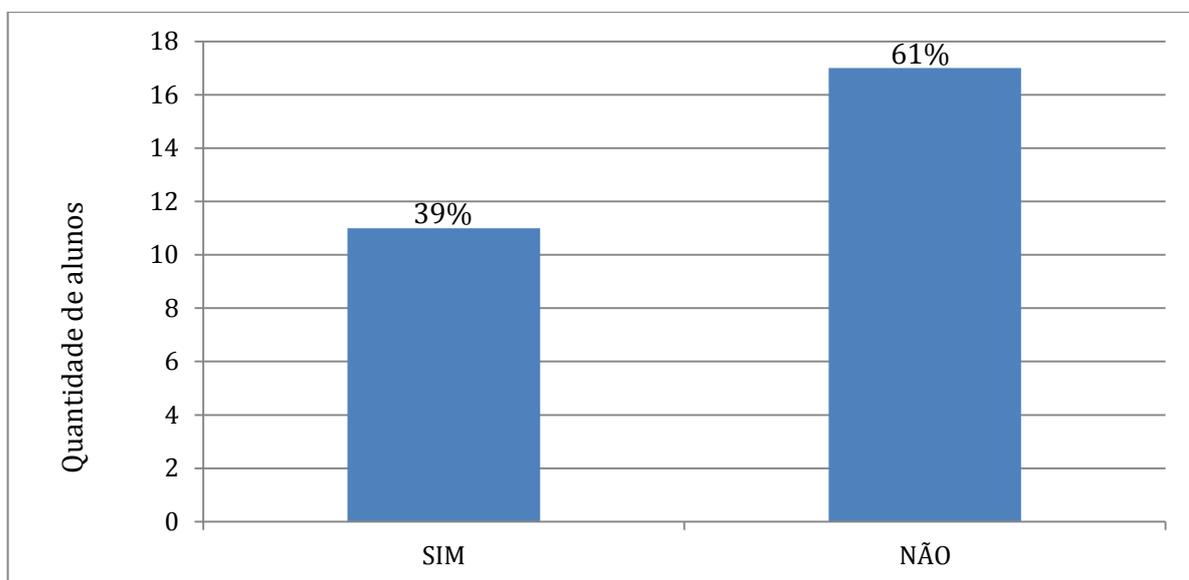
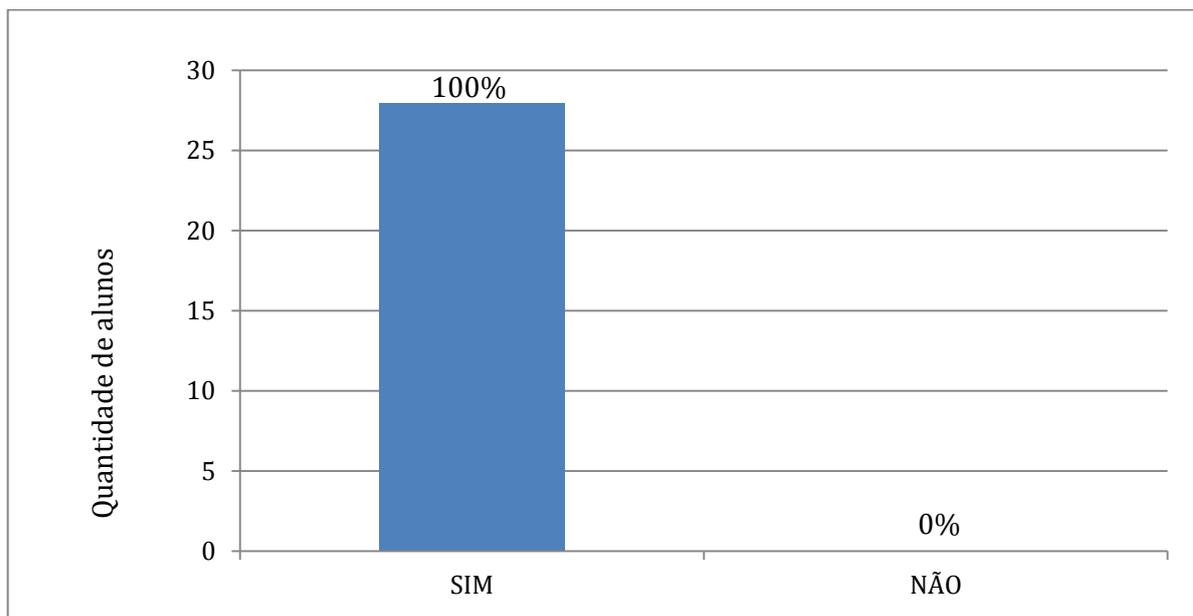


Figura 9 – Resultado da questão 2 após aplicação do produto

Questão 3. Dentre as opções abaixo de temas estudados na Física Quântica, quais deles você já ouviu falar e tem um certo entendimento?

- a) Números complexos
- b) Matrizes
- c) Dualidade onda partícula
- d) Dupla Fenda
- e) Fótons
- f) Interferência de ondas
- g) Interferômetros
- h) Espaços vetoriais quânticos

Na terceira questão, foram observados os desempenhos dos discentes em todas as alternativas. A proposta é a busca pelo aprendizado da física, e da matemática básica até a mecânica quântica abordada nos livros didáticos adotados no ensino médio. Nesse caso, as somas dos percentuais das alternativas podem ultrapassar os 100%, pois cada aluno pode escolher mais de um item. Veja os gráficos das Figs. 10 e 11.

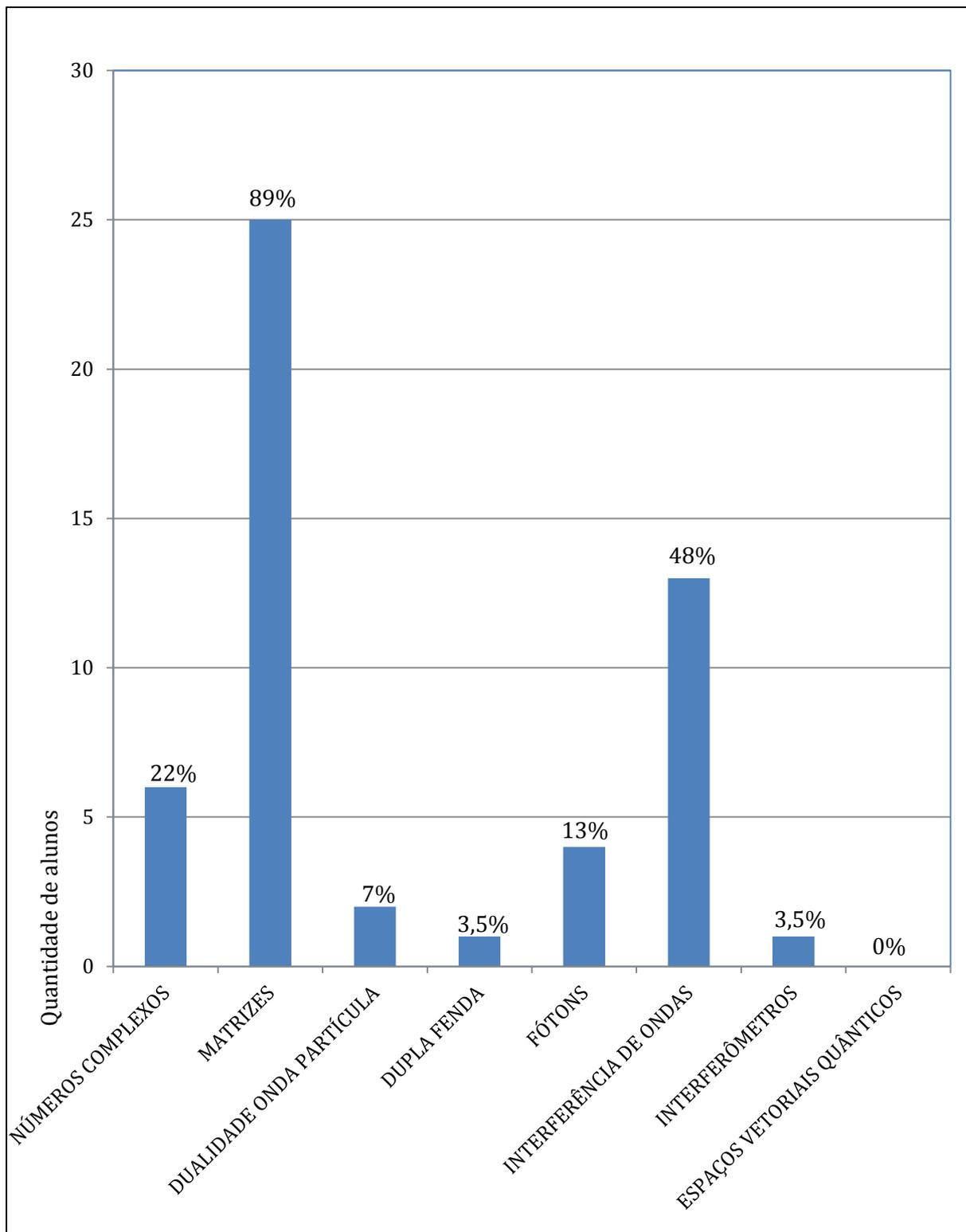
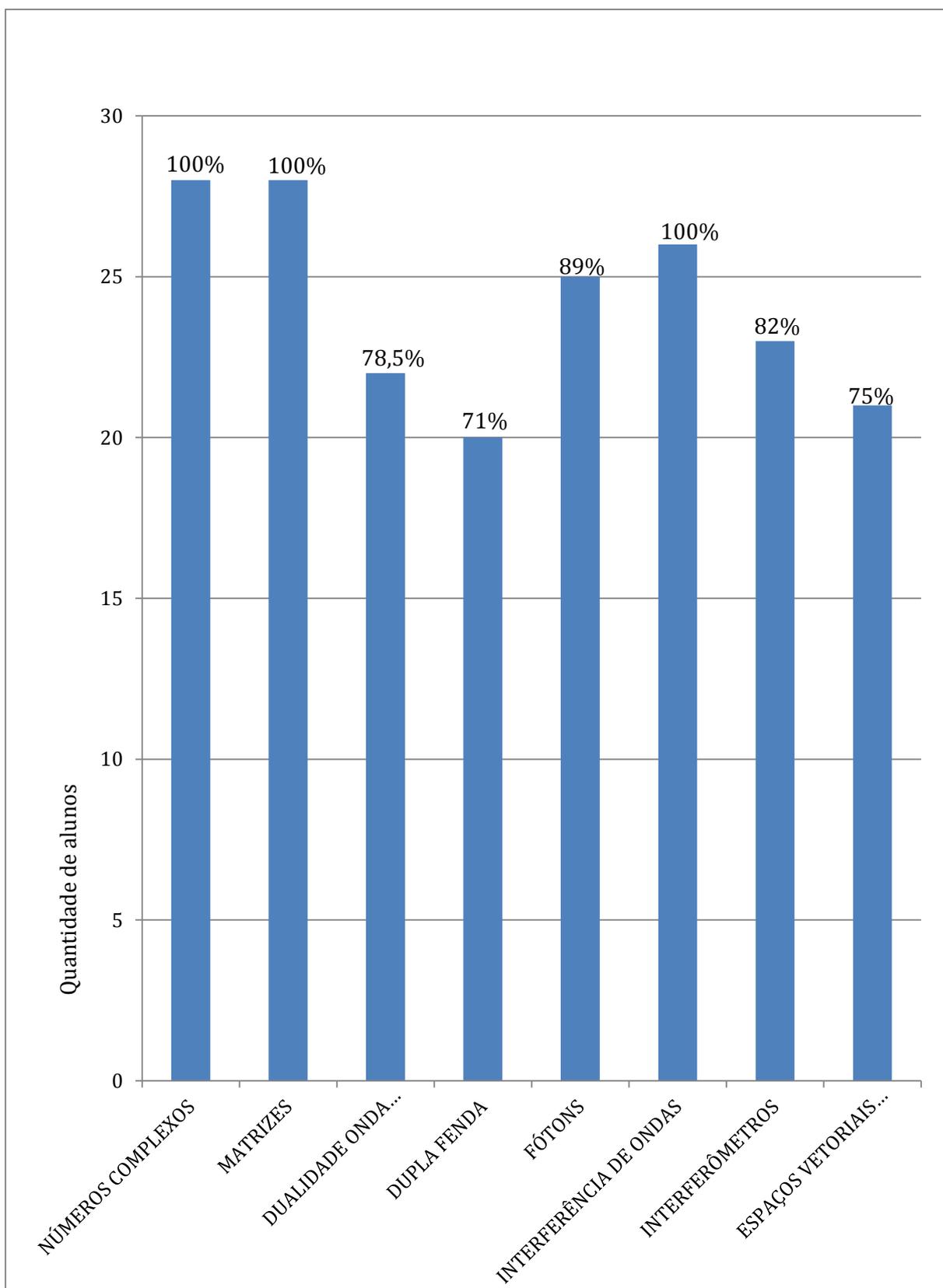
Figura 10 – Resultado da questão 3 antes da aplicação do produto

Figura 11 – Resultado da questão 3 depois da aplicação do produto

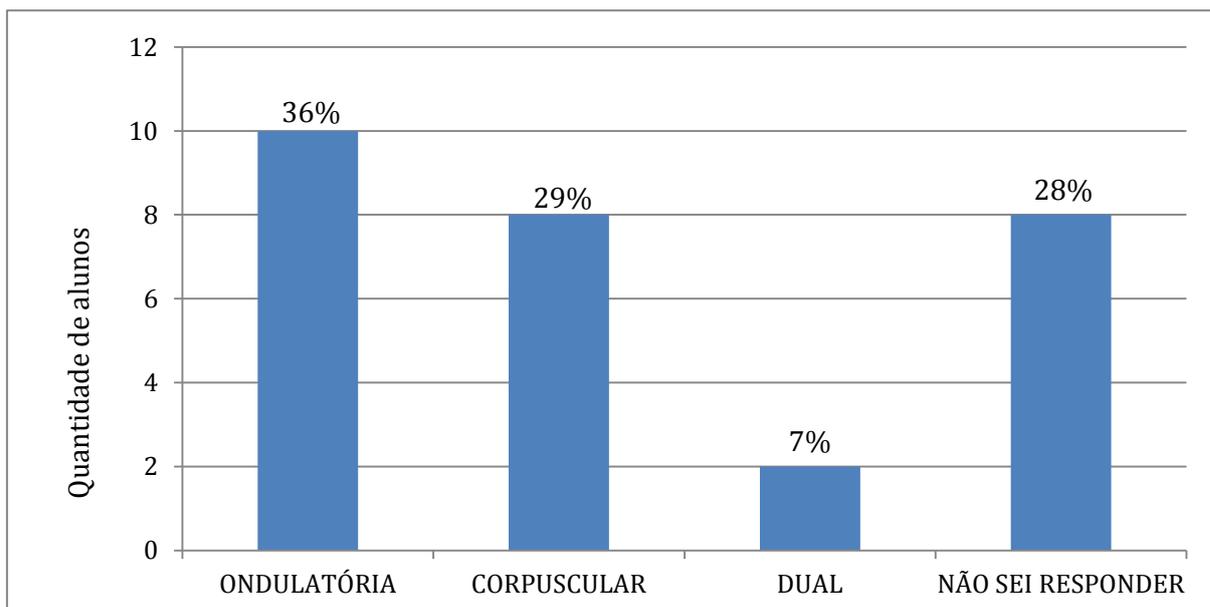
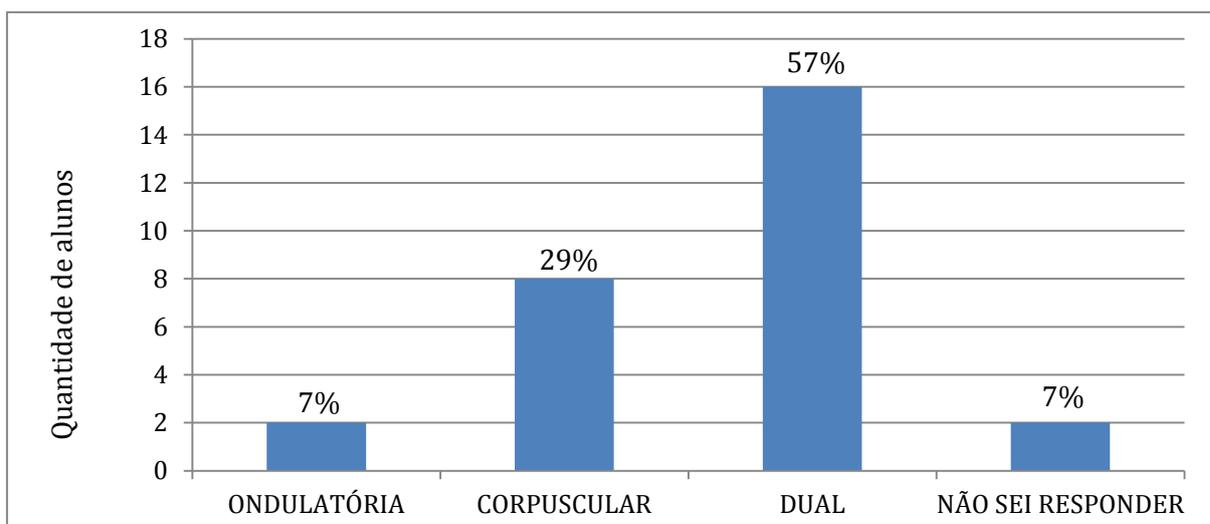
No pré-teste, o conteúdo de matrizes alternativa (B) foi o único que passou dos 50%, e conseguiu atingir 89%. Nenhuma das alternativas, A (números complexos, 22%), C (dualidade onda-partícula, 7%), D (dupla fenda, 3,5%), E (fótons, 13%), F (interferência de ondas, 48%) e G (interferômetros, 3,5%), atingiram mais de 50%. Portanto, foi insatisfatório o nível de conhecimento preexistente. A alternativa H (espaços vetoriais quânticos) não foi mencionada pelos alunos (0%).

No pós-teste, observamos um entendimento significativo em todos os itens. É relevante destacar que os temas abordados no ensino médio apresentaram 100% de aprendizagem. Sendo estes temas representados nas alternativas: A (números complexos), B (matrizes) e F (interferência de ondas). Nos outros temas não estudados no ensino médio, verificamos um aumento significativo da aprendizagem, sendo representado nas alternativas: C (dualidade onda-partícula, 78,5%), D (dupla fenda, 71%), E (fótons, 89%), G (interferômetros, 82%) e H (espaços vetoriais quânticos, 75%).

Questão 4. O fóton tem natureza:

- a) ondulatória
- b) corpuscular (partícula)
- c) “dual”, pois apresenta ambos os comportamentos, ondulatório e corpuscular.
- d) não sei responder

Na quarta questão, onde perguntamos sobre a natureza da luz, diferentemente da anterior, só existe uma alternativa correta. Neste caso, destacamos o comportamento quântico da luz, por meio do fóton no experimento do interferômetro de Mach-Zehnder. Neste sentido, foi feita análise comparativa sobre a natureza da luz nos gráficos das Figs. 12 e 13, antes e depois do questionário aplicado.

Figura 12 – Pré-Teste com a questão 4**Figura 13 – Pós-teste com a questão 4**

Antes do teste aplicado, obtivemos o resultado: A (ondulatória, 36%), B (corpúscular, partícula, 29%), C (dual, 7%), D (não sei responder, 28%). Depois do teste aplicado, detectamos um percentual acentuado para a alternativa correta (C), representando um percentual de 57% (Fig. 13). Este é um percentual não satisfatório. Assim, explicamos mais uma vez o conteúdo até chegarmos a um entendimento do conceito, apresentando, assim, um crescimento do conhecimento em relação aos conceitos novos estudados.

Questão 5. Você já ouviu falar sobre o interferômetro de Mach-Zehnder?

- a) sim
- b) não

Na quinta questão, quando os alunos são indagados no caso específico do interferômetro de Mach-Zehnder, os estudantes disseram que nunca ouviram falar. Todavia, um aluno, que já tinha realizado uma leitura em um livro do ensino médio de física sobre o interferômetro de Michelson-Morley, ponderou que ficou mais simples a compreensão desse novo interferômetro.

Figura 14 – Resultado da questão 5 antes da aplicação do produto

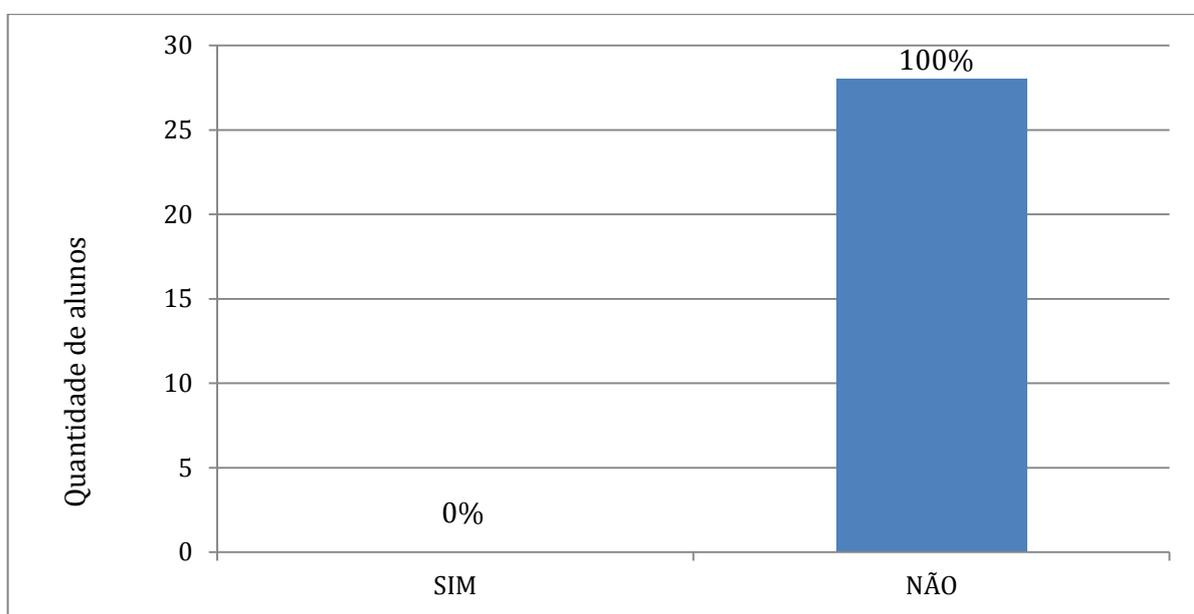
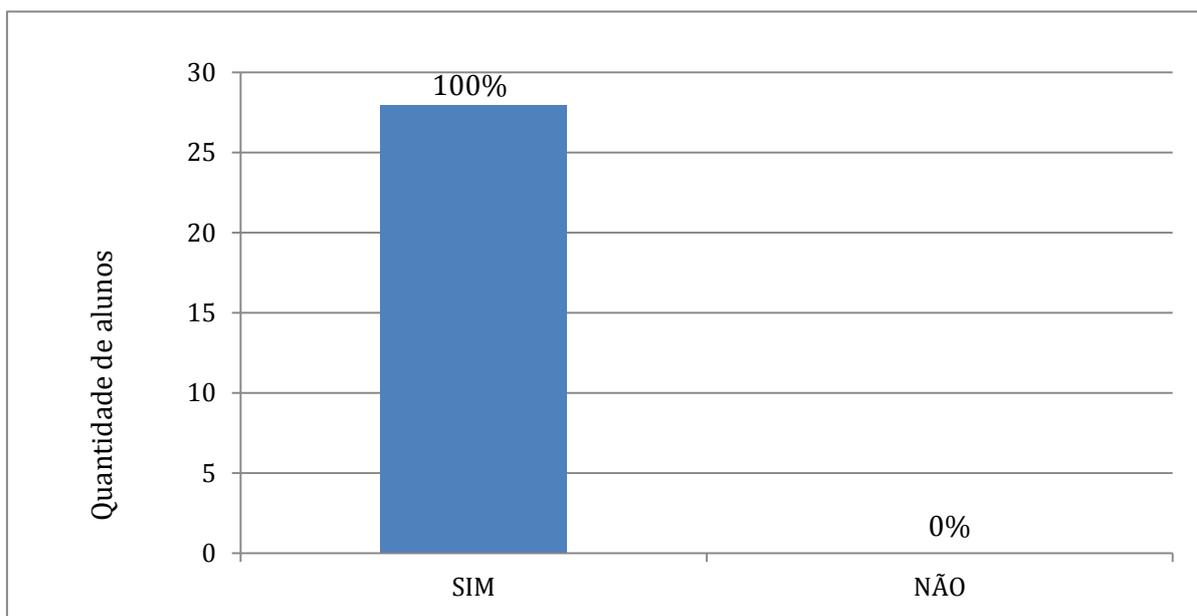


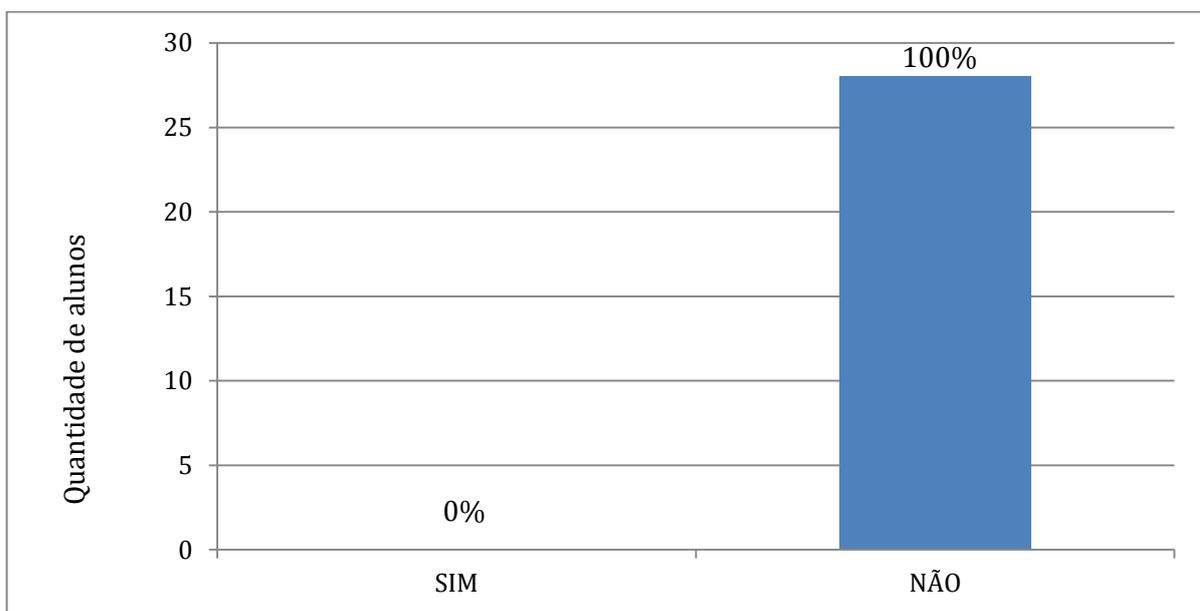
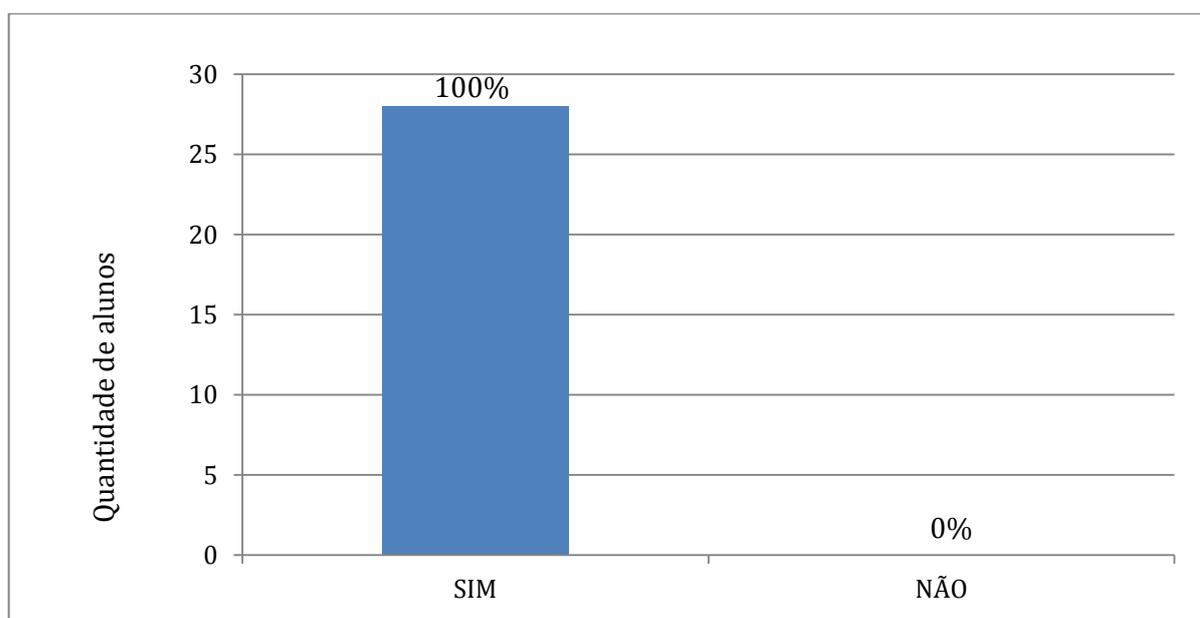
Figura 15 – Resultado da questão 5 depois da aplicação do produto

Depois de aplicado o produto educacional, observa-se no gráfico da Fig. 15 um nível de compreensão dos conceitos e definições do interferômetro de Mach-Zehnder muito satisfatório, correspondendo a 100%.

Questão 6. Você conhece alguma aplicação de um interferômetro?

- () sim
- () não

Na sexta questão, a pergunta foi utilizada para sondagem sobre o conhecimento dos alunos de alguma aplicabilidade do interferômetro no cotidiano. Em que foi citado como aplicação: os locais propícios para prospecção geológica mineral e a detecção de poços de petróleo. Os gráficos das Figs. 16 e 17 demonstram precisamente o nível de compreensão dos alunos sobre as aplicabilidades do tema antes e após aplicação do questionário.

Figura 16 – Resultado da questão 6 antes da aplicação do produto**Figura 17** – Resultado da questão 6 depois da aplicação do produto

Como resultado, nesta questão temos uma total inversão de compreensão, pois todos os 28 alunos citaram que não sabiam de nenhum exemplo de interferômetro e, posteriormente à aplicação do produto, todos além de conhecer, compreenderam os exemplos apresentados.

Questão 7. O vídeo apresentado na primeira aula, que aborda sobre o interferômetro de Mach-Zehnder com alguns exemplos, contribuiu para um melhor entendimento do conteúdo?

- a) Muito
- b) Mais ou menos
- c) Pouco
- d) Não

Na sétima questão, foram apresentados trechos de vídeos no total de aproximadamente 18 minutos, explicando como é a construção dos objetos físicos utilizados e o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder. Os gráficos das Figs. 18 e 19 mostram o nível de compreensão dos discentes, antes do questionário e posteriormente a sua aplicação.

Figura 18 – Pré-teste com a questão 7

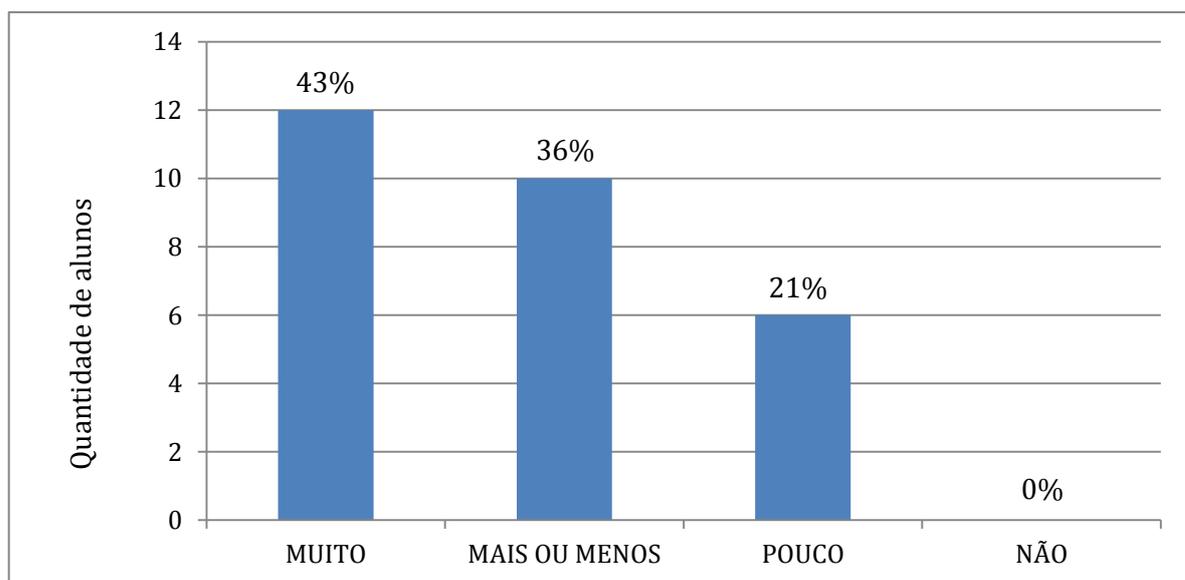
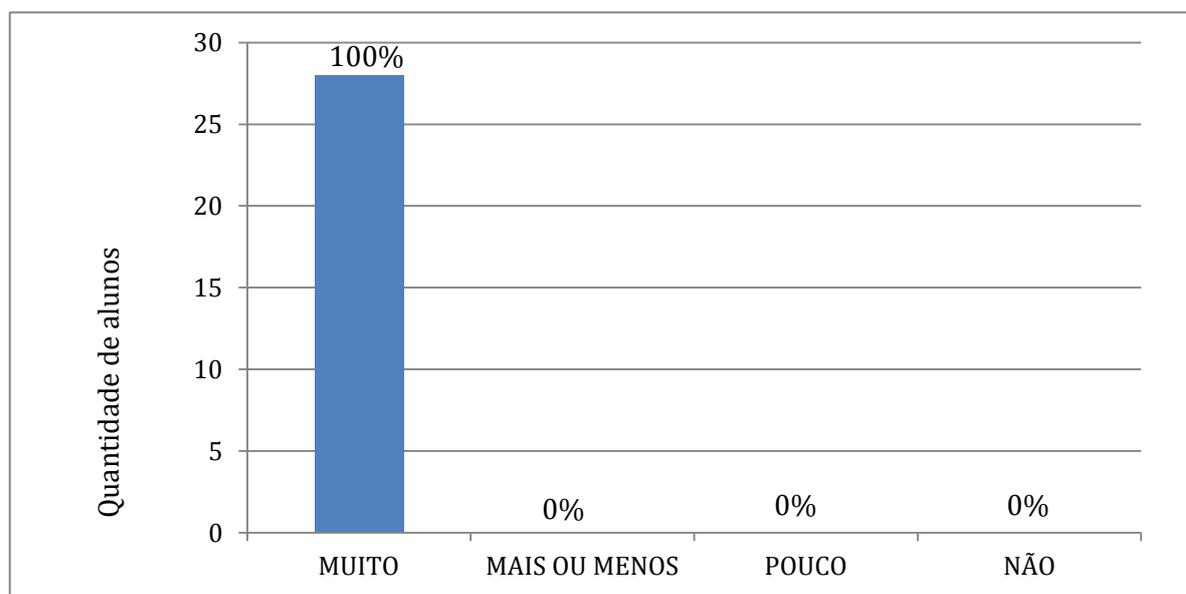


Figura 19 – Pós-teste com a questão 7

Do percentual dos alunos que acharam muito importante a apresentação dos vídeos, a alternativa A (muito) subiu notoriamente de 12 para 28 citações; os que responderam alternativa B (mais ou menos) decresceu de 10 para 0 citações; a alternativa C (pouco), passou de 6 para 0 citações; e na alternativa D (não) todos concordaram que o vídeo foi responsável por proporcionar um melhor entendimento. Isso reflete que imagens e vídeos influenciam no processo de ensino e aprendizagem.

Questão 8. Na Mecânica Quântica, o que significa colapsar?

- Falhar de forma abrupta.
- Sufrer uma queda de energia de forma rápida.
- Entrar em estado terminal.
- Dentre as várias probabilidades de estado que o objeto tem, somente um é medido.

Na oitava questão, falamos sobre as características dos conceitos da mecânica quântica e suas aplicações no experimento teórico das medições livres de interação COM e SEM objeto. Existe um significado físico quando o fóton colapsa em um dos detectores. As respostas dos alunos foram agrupadas nos gráficos das Figs. 20 e 21, mostrando, assim, o quantitativo de acertos. A resposta esperada é a letra D.

Figura 20- Pré-teste com a questão 8

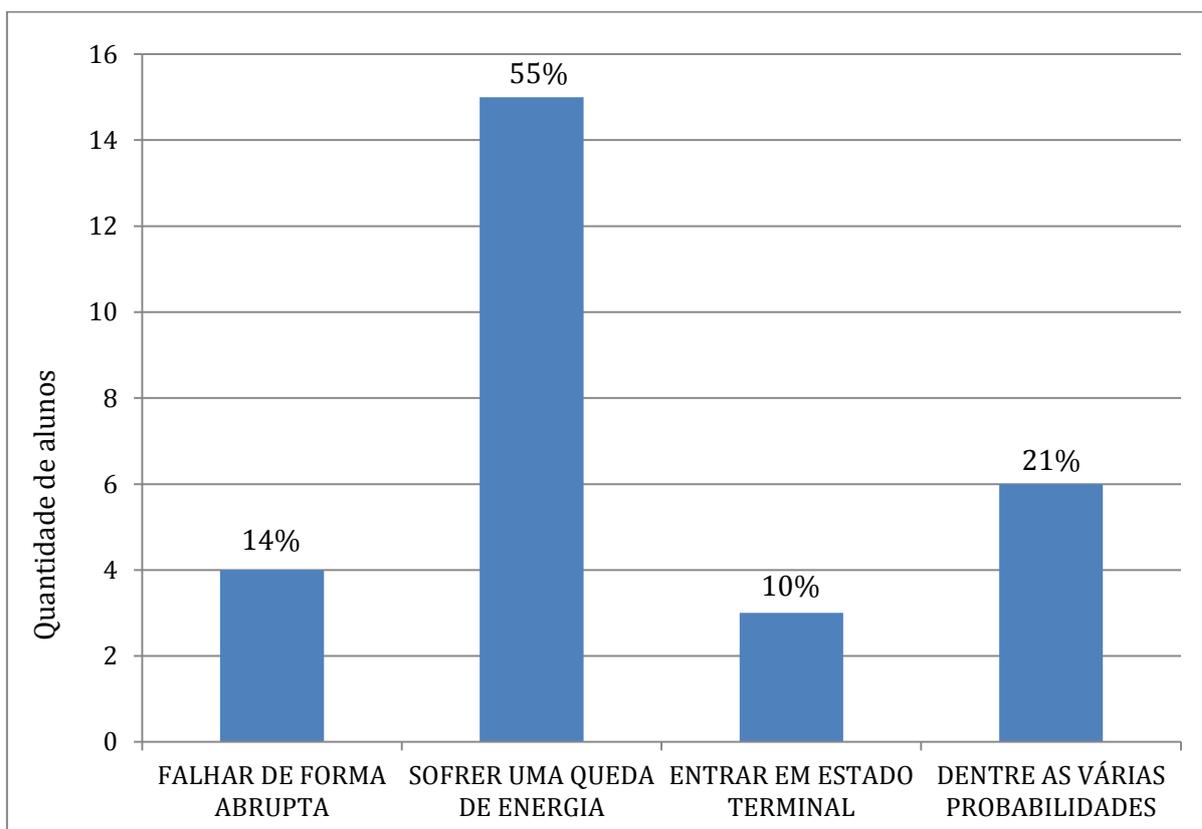
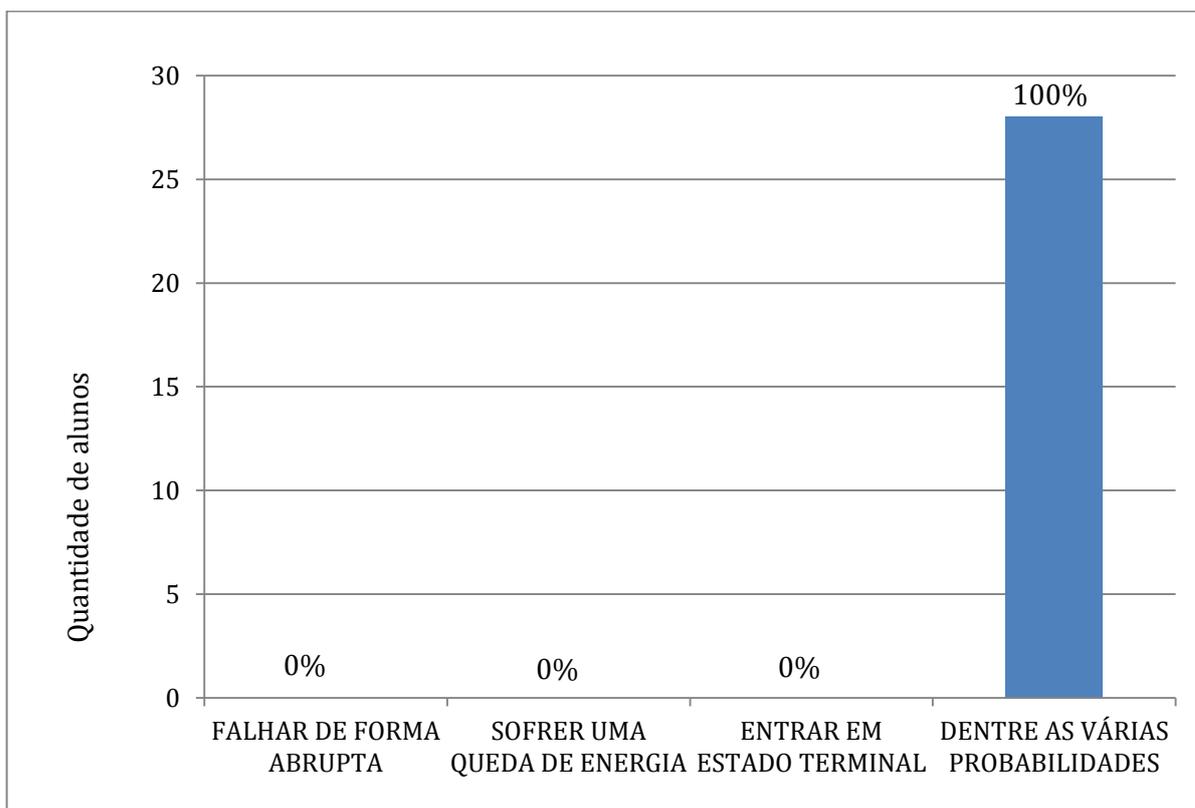


Figura 21 – Pós-teste com a questão 8



Nesta questão, ocorreu uma modificação notória, pois no pré-teste os percentuais dos alunos se distribuem pelas alternativas A (14%, 4 citações), B (55%, 15 citações), C (10%, 3 citações) e D (21%, 6 citações). E no pós-teste, observa-se um nível de compreensão acentuado, pois chegamos a 100% de 28 citações. É importante ressaltar que outros significados da palavra colapsar também foram explanados pelos discentes, como por exemplo, “morrer, acabar e destruir”.

Diante do fim deste questionário é necessário destacar como é urgente uma conexão da sala de aula com a realidade, pois os adolescentes que estão concluindo o ensino médio precisam estabelecer essa inserção do mundo contemporâneo nos temas que os mesmos estudam em sua formação cidadã durante a vida.

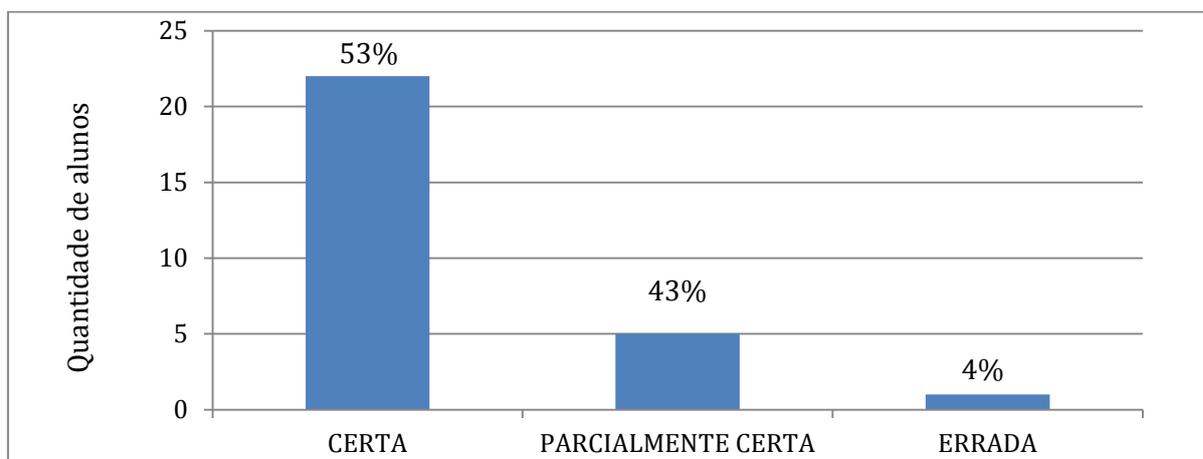
4.2 Aplicação do questionário localizado no apêndice C

A seguir apresentamos cada uma das questões que estão no apêndice C. Nesta seção observamos que há tanto questões objetivas como subjetivas. Assim, continuamos com a análise dos resultados obtidos.

Após a aplicação das 6 aulas, esta seção é dedicada à análise da aprendizagem descrita no produto educacional. Este questionário tem como objetivo verificar a evolução do nível de aprendizagem dos alunos, já que essas novas questões possuem um nível de complexidade maior e mais direcionado ao conteúdo apresentado no produto.

Questão 1. Por que utilizamos números complexos na mecânica quântica?

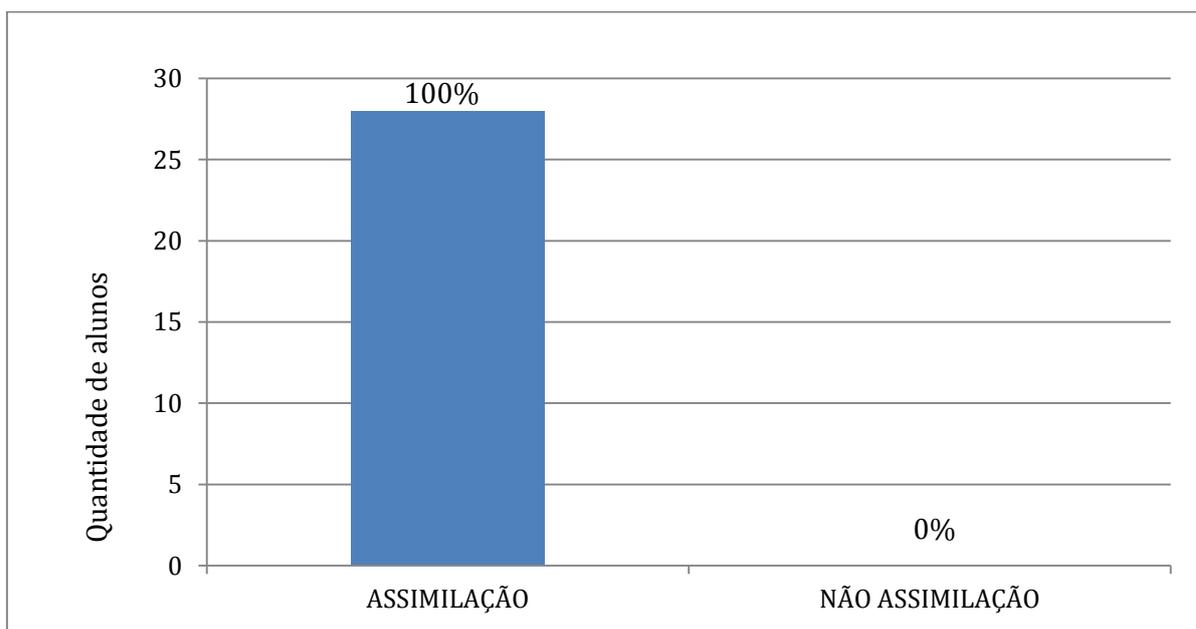
Na primeira questão, os discentes discorreram sobre o conteúdo de números complexos aplicado à MQ. Assim, apresentaram um nível de compreensão significativa depois do produto educacional aplicado.

Figura 22 – Percentual de acertos da questão 1

Pode-se observar, por meio dos resultados, que 15 alunos responderam de forma certa, correspondendo a 53%. E responderam parcialmente certa 12 alunos com percentual de 43%, e apenas 1 totalmente errada com 4%. A resposta desejada nessa questão subjetiva seria o seguinte enunciado: devido as suas propriedades, os números complexos conseguem justificar e modelar em nível básico os fenômenos da mecânica quântica.

Questão 2. Por que a mecânica quântica não pode ser completamente derivada a partir da física clássica?

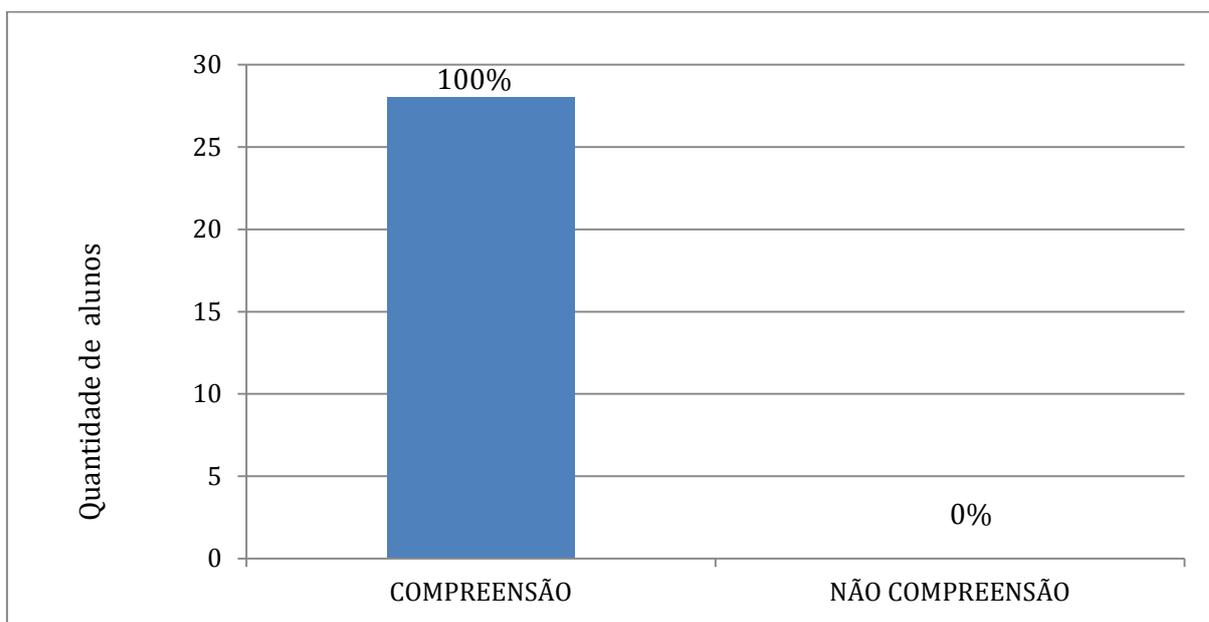
Na segunda questão, o objetivo foi verificar se os alunos conseguiram diferenciar a física clássica da física quântica levando em consideração uma partícula, uma vez que na física clássica podemos definir o estado da partícula por meio da posição e momento. Todavia, a física quântica é probabilística e não tem como definir com precisão, ambos, posição e momento.

Figura 23 – Percentual de assimilação da questão 2

Diante dos conceitos novos apresentados, os alunos conseguiram assimilar o conteúdo 100% de maneira contundente a explicação de como uma pode ou não ser derivada da outra, pois se na física clássica uma partícula tem seu estado bem definido pela sua posição e momento, é admissível saber em um determinado instante os resultados de qualquer medida realizada sobre ela. E diferentemente, na mecânica quântica, não se consegue prever com precisão o resultado de algumas medidas realizadas sobre ela. O que se tem como resultado são probabilidades da medida em relação aos valores possíveis para tais grandezas.

Questão 3. Qual o significado do símbolo matemático $|\text{ket}\rangle$?

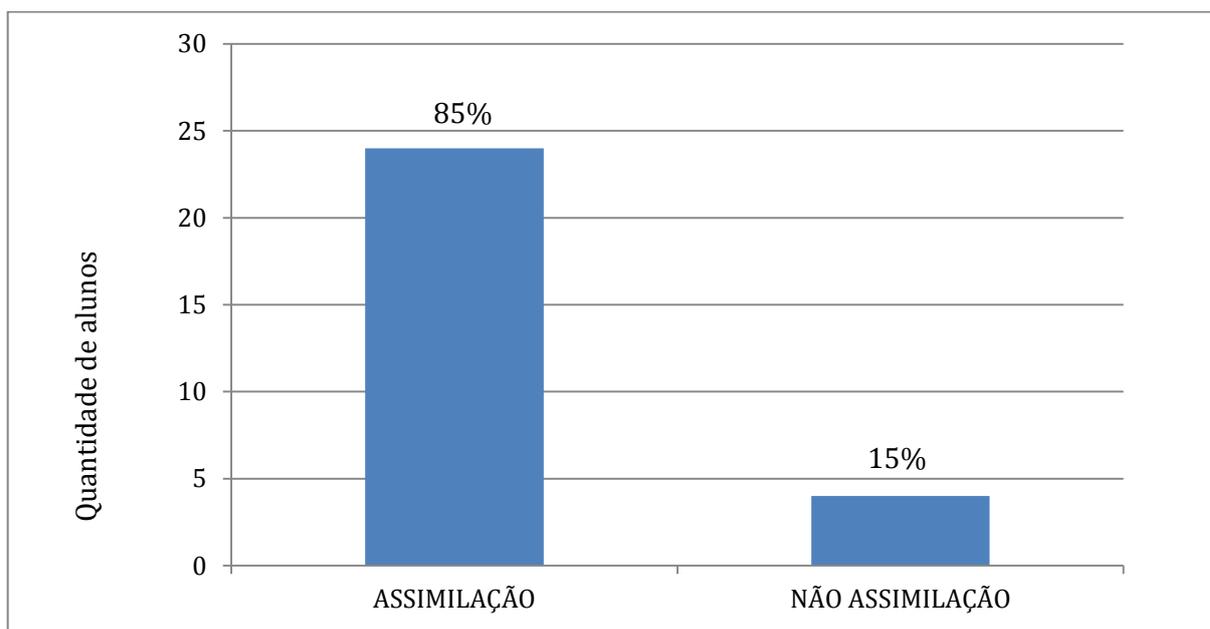
Na terceira questão, quando falamos em espaços vetoriais na MQ, utilizamos o símbolo matemático “ket”, que tem na física um significado abstrato, porém de fundamental importância por meio de cálculos envolvendo matrizes.

Figura 24 – Nível de compreensão da questão 3

Os discentes, após estudarem a sequência didática em conjunto com as orientações do professor, obtiveram um resultado de 100% quanto ao significado do símbolo matemático chamado *ket*, pois foi verificado que teve apropriação do significado do símbolo por parte dos alunos, que foi examinado por meio do questionário. Assim, a resposta esperada quanto ao significado correto de *ket* na mecânica quântica é: um estado físico representado por um vetor, contendo as informações sobre o sistema físico, cujo símbolo é escrito dessa forma $|\ \rangle$. Além disso, o *ket* é representado por uma matriz coluna do estado de um fóton.

Questão 4. Se o fóton é uma partícula de luz indivisível, o que ocorre quando esta passa pelo primeiro espelho semitransparente?

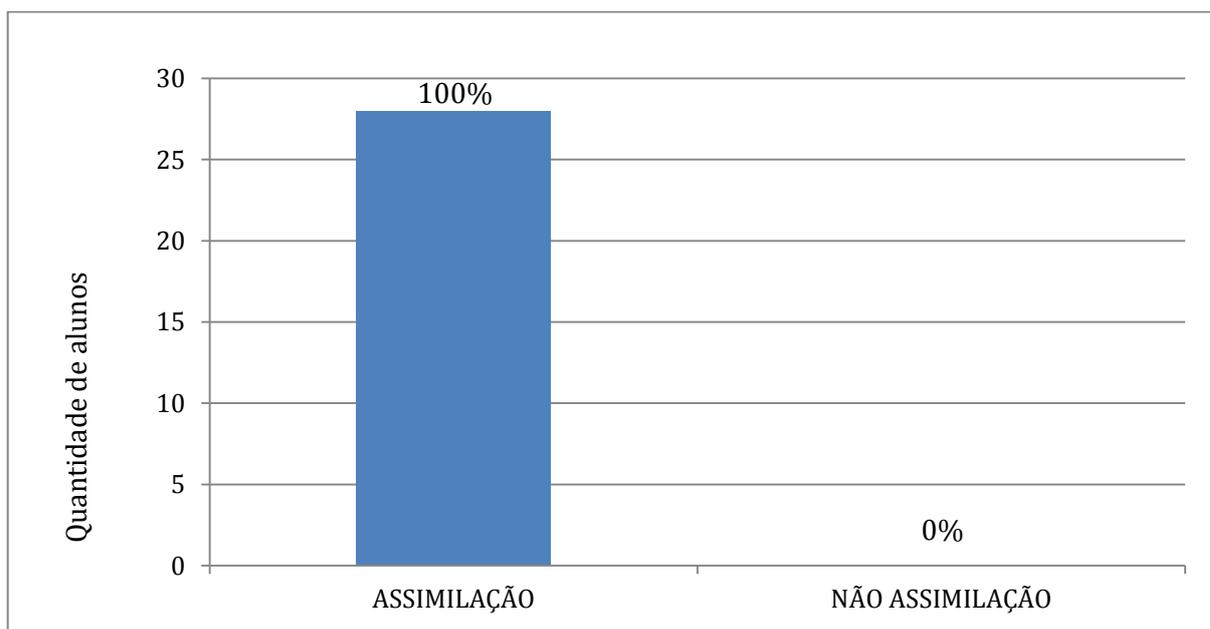
Na quarta questão, diante de algumas situações sobre o comportamento dual da luz, o interferômetro de Mach-Zehnder quântico busca a compreensão de que fóton é uma partícula de luz indivisível, mas pode seguir dois caminhos distintos do interferômetro. Esta propriedade é conhecida como superposição de trajetórias.

Figura 25 – Nível de assimilação da questão 4

O gráfico da Fig. 25 demonstra que 85% dos alunos assimilaram o conceito envolvido na passagem do fóton pelo primeiro espelho semitransparente, e 15% de não assimilaram. A resposta esperada do que acontece com o fóton é: a superposição quântica ao passar pelo primeiro espelho semitransparente.

Questão 5. Quando o estado do fóton colapsa em um dos detectores no interferômetro de Mach-Zehnder, qual seu significado?

Na quinta questão, o experimento teórico de Mach-Zehnder descreve um fóton desde o primeiro espelho semitransparente, passando pelo espelho de reflexão total, pelo segundo espelho semitransparente, até chegar em um dos detectores e ocorrer o colapso. Nessa questão pergunta-se qual o significado da palavra colapso.

Figura 26 – Nível de assimilação da questão 5

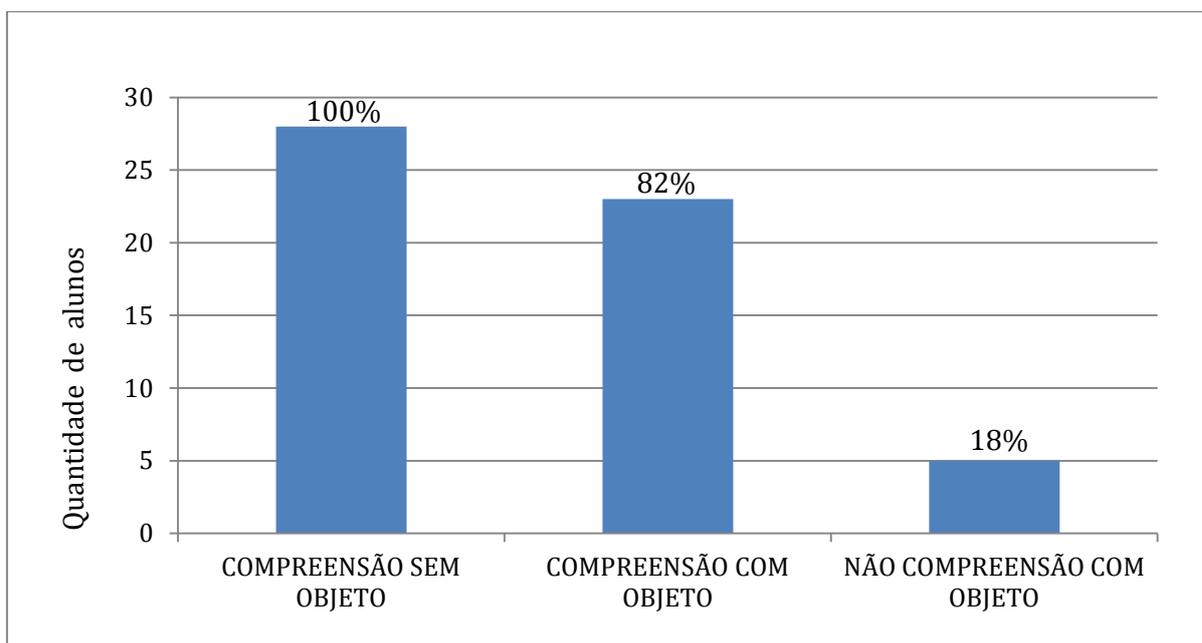
Lembramos que no primeiro questionário já foi perguntado em uma questão objetiva qual seu significado. Mas, devido a importância desse termo, colocamos novamente para corroborar o entendimento. Assim, foi observado 100% de assimilação do termo.

Questão 6. Qual o significado físico das medições livres de interação no interferômetro de Mach-Zehnder, quando não há objeto e quando há objeto obstruindo um dos caminhos do fóton?

Na sexta questão, quando estudamos as medições livres de interações sem objeto obstruindo um dos caminhos, obtemos como resultado uma interferência construtiva em um dos detectores e destrutiva no outro, ou seja, independentemente se o estado do fóton inicial escolhido para o sistema seja $|1\rangle$ ou $|2\rangle$ ocorre uma interferência construtiva no detector em que o fóton colapsar, isto é, a probabilidade é de 100% em um dos detectores.

Quando estudamos as medições livres de interação com objeto obstruindo um dos caminhos, observamos que o colapso nos detectores D_1 ou D_2 não são de 100% para nenhum dos dois, nesse caso ocorre uma distribuição de probabilidade entre os três estados: $|1\rangle$, $|2\rangle$ e $|\text{espalhado}\rangle$.

Figura 27 – Nível de compreensão da questão 6, com ou sem objeto obstruindo um dos caminhos



Nessa questão ocorreu uma dificuldade mais notória nas medições livres de interação com objeto, pois diante do que foi explicado no produto, sem a presença do objeto e o experimento sendo realizado com o estado do fóton $|1\rangle$, o detector D_1 clicava com 100% de probabilidade, isto é, ocorre o colapso em D_1 ; com isso, D_2 nunca clicava. E com um objeto espalhando o fóton em um dos caminhos, os discentes observaram que D_2 pode clicar, significando a existência de um objeto obstruindo um dos caminhos. O nível de compreensão nesse tópico foi de 82% com objeto, e sem objeto de 100% e não compreensão com objeto de 18%.

Seguindo com o significado das medições livres de interação, agora com os cálculos matemáticos, as questões 7 e 8 exigem que os alunos façam as probabilidades de colapso em cada estado do fóton exibido na superposição.

Questão 7. De acordo com a superposição proposta, $-\frac{1}{2}|1\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|2\rangle$, qual a probabilidade do fóton colapsar nos estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$?

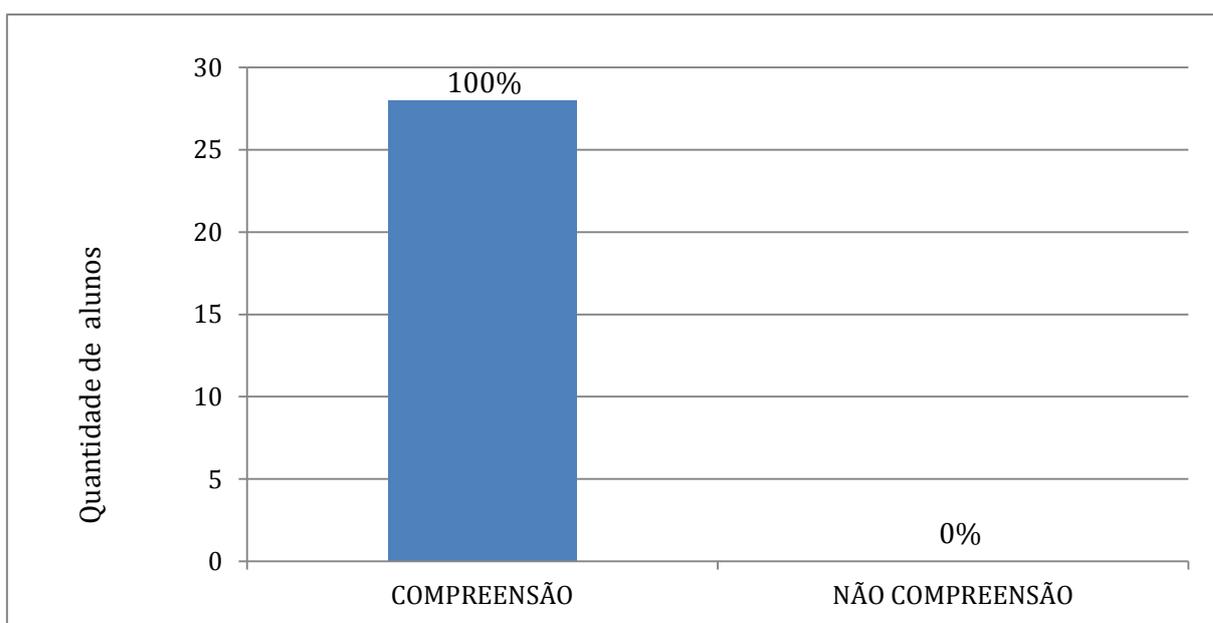
Na sétima questão, ao realizar o cálculo matemático, obtemos como resultado no estado $|1\rangle$ um percentual de 25% e no estado $|2\rangle$ o resultado de 75%. Nessa questão os discentes tiveram facilidade em responder.

Questão 8. Em um interferômetro onde existe um objeto obstruindo um dos caminhos, calcule a probabilidade do estado espalhado, considerando que o estado do sistema é:

$$-\frac{1}{2\sqrt{2}}|1\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|2\rangle + \frac{i}{2\sqrt{2}}|\text{espalhado}\rangle.$$

Na oitava questão, ao calcular o estado do fóton $|1\rangle$, $|2\rangle$ e $|\text{espalhado}\rangle$, temos o resultado das probabilidades de cada um, respectivamente, 12,5%, 75% e 12,5%. Assim, nas questões 7 e 8, os alunos responderam com facilidade, obtendo 100% de compreensão.

Figura 28 – Nível de compreensão das questões 7 e 8, com e sem objeto obstruindo um dos caminhos



As questões mencionadas abordam cálculos matemáticos semelhantes. Porém, com a diferença que a questão 8 tem um estado espalhado. Assim, é constatado a presença de um objeto obstruindo um dos caminhos. Nesses dois itens obtivemos 100% de compreensão.

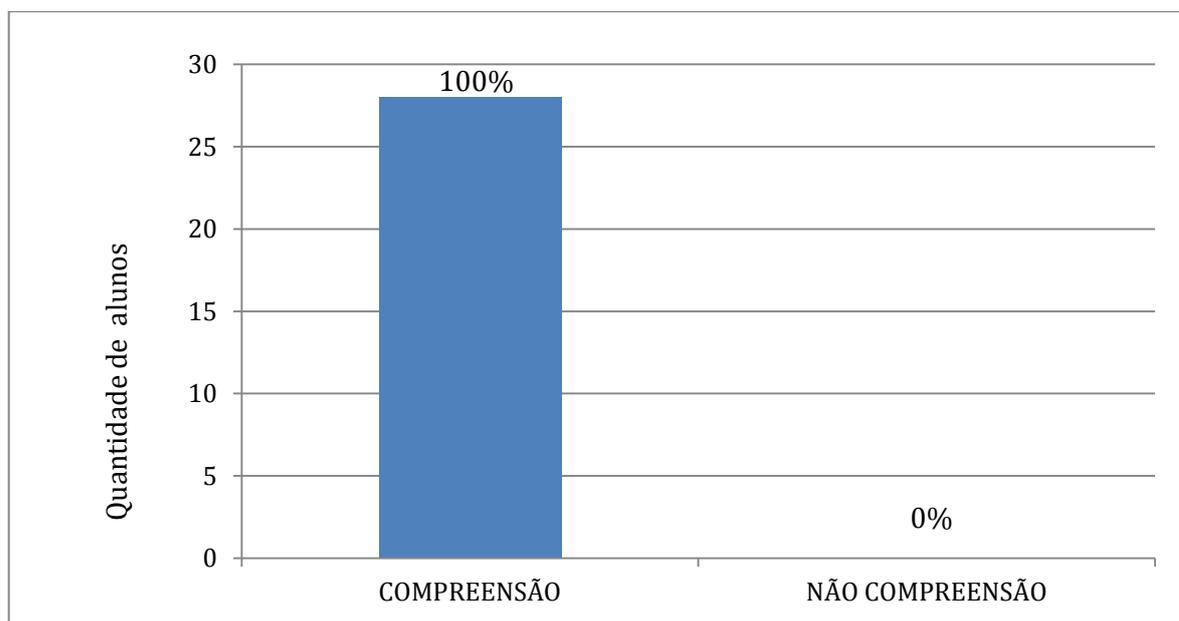
Questão 9. Quando o fóton representado por $|1\rangle$, no experimento teórico das medições livres de interação sem objeto, passa por todos os espelhos e colapsa no detector D_1 , que tipo de interferência podemos observar?

- a) Interferência construtiva.
- b) Interferência destrutiva.
- c) Interferência livre.
- d) Interferência de medida.
- e) Estão corretas as alternativas a, b, c e d.

Questão 10. Qual tipo de interferência ocorre no detector D_2 seguindo o enunciado da questão 9?

Nas questões 9 e 10, destacamos novamente o que ocorre com o fóton ao colapsar em um dos detectores. Dessa forma, reforçamos o nível de compreensão das medições livres de interação.

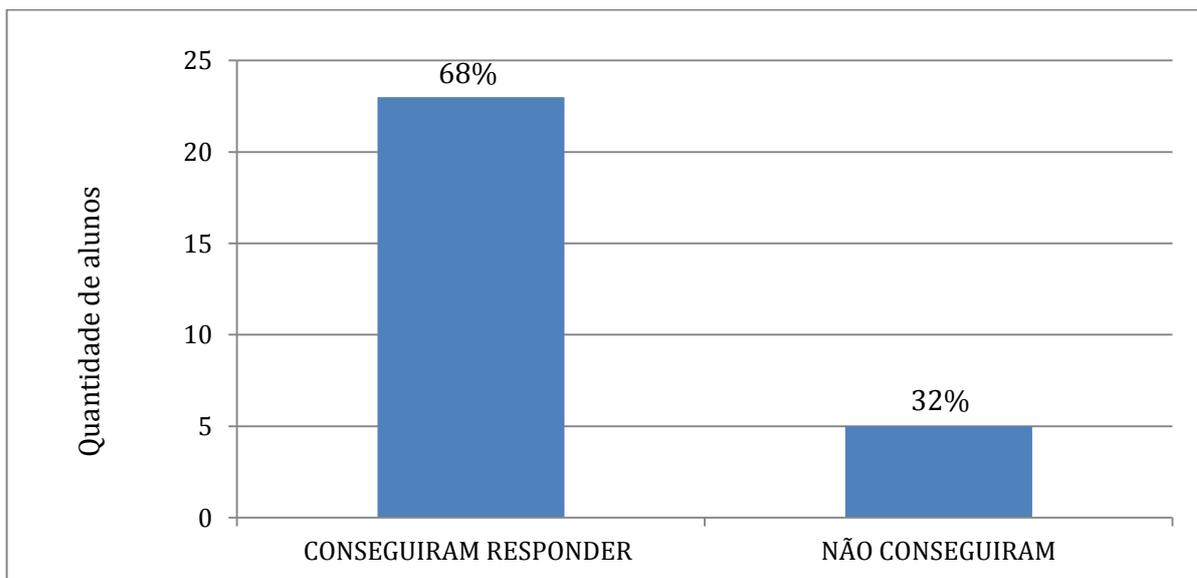
Figura 29 – Nível de compreensão das questões 9 e 10, com e sem objeto obstruindo um dos caminhos



Ao analisar a questão, os discentes obtiveram 100% de aproveitamento, todos os alunos marcaram A na questão 9, e na questão 10 todos marcaram a letra B.

Questão 11. Para praticar e entender melhor o que ocorre nos cálculos matemáticos realizados quando o estado do fóton é $|1\rangle$, realize os cálculos considerando que o estado do fóton inicial fosse $|2\rangle$.

Na questão 11, analisando o experimento teórico com o estado do fóton $|1\rangle$, ao colocar os alunos para praticar este cálculo sendo agora com o estado do fóton $|2\rangle$, analisa-se o desenvolvimento matemático dos discentes diante de novos símbolos e nova interpretação. E durante o desenvolvimento dos cálculos, sondamos que alguns alunos não conseguiram responder por apresentarem dificuldades na matemática básica, a maioria, olhando o passo a passo realizado no produto educacional e após a explicação da sequência didática, fizeram com êxito os cálculos.

Figura 30 – Percentual dos alunos que conseguiram responder à questão 11

Diante da representação matricial da notação de Paul Dirac, 19 discentes (68%) assimilaram e resolveram os cálculos matemáticos, sendo o estado inicial do fóton $|2\rangle$. Os outros 9 alunos (32%) não conseguiram resolver os cálculos matemáticos, porém compreenderam o desenvolvimento conceitual.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio das discussões e análise dos dados, verificou-se que os discentes não possuíam conhecimento prévio algum sobre o interferômetro de Mach-Zehnder. Nesse sentido, também existe a necessidade de estimular a experimentação teórica, buscando concretizar as relações da Física Moderna Contemporânea (FMC) com o cotidiano, demonstrando aos alunos a importância da Mecânica Quântica (MQ) no mundo ao qual está inserido.

Os bons resultados alcançados com a aplicação do produto educacional por meio das análises e discussões dos dados obtidos nos questionários celebraram um desenvolvimento das habilidades dos alunos relacionadas aos conceitos de mecânica quântica.

A elaboração de metodologias alternativas viabilizadas no produto educacional tiveram como ênfase o estudo da mecânica quântica, pois temas relacionados à física contemporânea praticamente não são vistos no ensino médio, principalmente os interferômetros. Na maioria das vezes, a física quântica é tratada apenas como mera curiosidade. Dessa forma, podemos ressaltar que se faz necessário que o ensino de mecânica quântica explique e complete os fenômenos que a física clássica não explica, proporcionando uma visão de mundo cada vez mais contemporânea.

Devido à grande dificuldade dos alunos do ensino médio em relação à matemática e de novos conceitos físicos presentes na mecânica quântica, se faz necessário procurar metodologias alternativas para inserção dos tópicos da mecânica quântica neste nível de ensino. Nesse sentido, é relevante destacar que o produto educacional desenvolvido no atual contexto do ensino médio significa uma evolução no aprendizado, garantindo aos discentes a abordagem de conteúdos contemporâneos.

REFERÊNCIAS

AUSUBEL, D. P. **Educational Psychology: A Cognitive View**. 2 ed. New York, Holt, Ed. Rinehart and Winston, 1968. 48 p.

AUSUBEL, D.P. **Educational psychology: a cognitive view**. 2 ed. New York, Holt Rinehart and Winston, 1978. 50 p.

AUSUBEL, D.P; NOVAK, J. & HANESIAN, L. **Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo**. 2. ed. México: Editorial Trillas, 1983. 85 p.

AUSUBEL, D. P; NOVAK, J. D ; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Interamericana, 1980. 92 p.

BARROS, Marina Valentim. **Uma proposta didática para o ensino de mecânica quântica nas licenciaturas: a notação de dirac**. 2011. 100 f. Dissertação (mestrado) Programa de Pós-graduação em ensino de Ciências e matemática, Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BRASIL, **Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências Humanas e suas Tecnologias**. Brasília: MEC, 2000.

BRASIL. Ministério da Educação: Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos PCN**. Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC, jun. 2002.

BRASIL. Secretaria de Educação Básica. Ministério da Educação Básica. Ministério da Educação. **Orientações Curriculares para o Ensino Médio**. Brasília, 2006.

BRASIL. Ministério da Educação: Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias**. Brasília: MEC, jun. 1998.

BACHELARD, Gaston. **O novo espírito científico**. 70 ed. Lisboa: Trad. de: Le Nouvel Esprit Scientifique, 1996. 73 p.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as Regras da Transposição Didática Aplicáveis aos Conceitos de Física Moderna? **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 3, p. 387–404, 2005.

BULGRAEN, V. C. O papel do professor e sua mediação nos processos de elaboração do conhecimento. **Revista Conteúdo**, v. 1, n. 4, p. 6, 2010.

CAMILO, M.E. **Produção de Interferômetros Mach-Zehnder utilizando guias de onda tipo pedestal e filmes finos**. São Paulo, 2014. 132 p.

CARNEIRO, M. A. **LDB fácil: leitura crítico-compreensiva, artigo a artigo. O novo espírito científico**. 18. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2011.

ELITZUR, Avshalom.; VAIDMAN Lev. Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements. **Foundations of physics**, v. 23, p. 987,1993.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 1979, 40 p.

FARIA, W. de. **Aprendizagem e planejamento de ensino**. São Paulo, Ática, 1989.

FILHO, Jenner Barreto Bastos.; SIQUEIRA, Antônio Fernandes. O experimento da dupla fenda como exemplo de incognoscibilidade? **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 15, p.2, 1993.

GRECA, Ileana Maria.; MOREIRA, Marco Antônio. Uma Revisão da Literatura sobre Estudos Relativos ao Ensino de Mecânica Quântica Introdutória, **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 6, n.1, p 29–56, 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 2009. 416 p.

JOAS, C. História da teoria quântica – desenvolvimentos e fundamentos. In.: **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais [online]**. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, p. 456, 2011.

JÚNIOR PIMENTEL, Roberto Affonso. **Uma história da interferometria no século XIX**. 2012. 397 f. Tese (doutorado) Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, Rio de Janeiro, 2012.

LOBATO, Teresa. Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de Física do Ensino Médio. **Revista Ciência e Educação**, v. 11, n.1, 2005.

MACHADO, D. I.; NARDI, R. Avaliação do ensino e aprendizagem de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio. Atas: **IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, Bauru, 2003.

LOBO, M. P.; GOMES, S. L. R. P.; ALENCAR, E. A.; SANTOS, C. M. F. Teleporte de uma partícula: um protocolo no contexto do ensino médio. **Física na escola**, v. 16, n. 2, p. 18–21, 2018.

MENESES, L.C. Uma física para o novo ensino médio. **Física na escola**, v. 1, n. 1, p. 6–8, 2000.

MULLER, T. Teaching Quantum Mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, v.70, n.3, p. 200–209, 2002.

MOREIRA, M. A. Ensino de física no brasil: retrospectiva e perspectivas. **Revista brasileira de ensino de física**. São Paulo. Vol. 22, n. 1, p. 94–99, 2000.

MOREIRA, M.A. **Aprendizagem significativa: a teoria de aprendizagem de David Ausubel**. São Paulo: Editora Moraes, 1982. 160 p.

MOREIRA, M. A. Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa. **Revista Chilena de Educação Científica**, v. 4, n. 2, p. 38–44, 2012.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem Significativa: Um Conceito Subjacente. **Aprendizagem Significativa em Revista**, v. 1, n. 3, p. 25–46, 2012.

MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.

MOREIRA, M. A. **Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas v e unidades de ensino potencialmente significativas**, material de apoio para o curso aprendizagem significativa no ensino superior: teorias e estratégias facilitadoras. Pontifícia Univerdidade Católica do Paraná, 2013.

NARDI, R. org. **Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores**. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. 258 p.

NOVAIS, STUDART. **Mecânica Quântica Básica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Eletromagnetismo**. 1. ed. São Paulo: Blucher, cap. 12, v. 3, 1997. 268–271 p.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica: Ótica, relatividade, física quântica**, 1. ed. São Paulo: Blucher, cap. 12, v. 3, 1998. 268-271 p.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 447–454, 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 18, n. 2, p. 135–151, 2001.

OSTERMANN, F.; SANDRA, E.; PRADO, D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder (Interpretations on quantum mechanics on a virtual Mach-Zehnder interferometer). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193–203, 2005.

PEREIRA, Alexsandro P.; OSTERMANN, Fernanda. Uma análise da produção acadêmica recente sobre o ensino de física moderna e contemporânea no Brasil. In: **VI Enpec- Encontro nacional de pesquisa em educação em ciências**, 11, Florianópolis, 2007.

PINHEIRO, N. A. M.; MATOS, E. A. S. A.; BAZZO, W. A. Refletindo acerca da ciência, tecnologia e sociedade: enfocando o ensino médio. **Revista Iberoamericana de Educación**, Madrid, v. 44, p. 147–165, 2007.

PINTO, A. ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.16, n.1, p 7–34, 1999.

PRADO, S. **Esquema de um interferômetro de Mach Zehnder**, 2006.

ROCHA, C. R. Introdução à Mecânica Quântica: uma proposta de minicurso para o ensino de conceitos e postulados fundamentais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 3, n. 1, p. 2, 2001.

STEEL, W. H. **Interferometry. Colecao Cambridge Monographs on Physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n.3, p. 209–214, 1992.

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

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros: Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 3, 2009. 300 p.

WOLF, R. Leaders, managers, entrepreneurs on and off the organizational stage. **Organization Studies (Walter de Gruyter GmbH & Co. KG.)**, v. 12, n. 4, 529–546, 1991.

ZETIE, K.P.; ADAMS, S. F.; TOCKNELL, R. M. “How Does a Mach-Zehnder interferometer work? **Physics Education**, v.35, n.1, p. 45, 2000.

APÊNDICE A – Questionário

1. De acordo com o desenvolvimento dos conteúdos da primeira série do ensino médio, a partícula pode também, ser chamada de:

- a) Corpúsculo
- b) Um objeto muito pequeno
- c) Um grão de areia

2. Em algum momento da sua vida de estudante, você ouviu falar em Mecânica Quântica?

- a) sim
- b) não

3. Dentre as opções abaixo de temas estudados na Física Quântica, quais deles você já ouviu falar e tem um certo entendimento?

- a) Números complexos
- b) Matrizes
- c) Dualidade onda partícula
- d) Dupla Fenda
- e) Fótons
- f) Interferência de ondas
- g) Interferômetros
- h) Espaços vetoriais quânticos

4. O fóton tem natureza:

- a) ondulatória
- b) corpuscular (partícula)
- c) “dual”, pois apresenta ambos os comportamentos, ondulatório e corpuscular.
- d) não sei responder.

5. Você já ouviu falar sobre o interferômetro de Mach-Zehnder?

- a) sim
- b) não

6. Você conhece alguma aplicação de um interferômetro?

- () sim
- () não

7. O vídeo apresentado na primeira aula, que aborda sobre o interferômetro de Mach-Zehnder com alguns exemplos, contribuiu para um melhor entendimento do conteúdo?

- a) Muito
- b) Mais ou menos
- c) Pouco
- d) Não

8. Na Mecânica Quântica, o que significa colapsar?

- a) Falhar de forma abrupta.
- b) Sofrer uma queda de energia de forma rápida.
- c) Entrar em estado terminal.
- d) Dentre as várias probabilidades de estado que o objeto tem, somente um é medido.

APÊNDICE B

SEQUÊNCIA DIDÁTICA: MEDIÇÕES SEM INTERAÇÃO EM UM INTERFERÔMETRO

LENILSON RODRIGUES DE OLIVEIRA

PROF. DR. MATHEUS PEREIRA LOBO

UFT 2019

Sumário

INTRODUÇÃO.....	3
1 TÓPICOS DE MECÂNICA QUÂNTICA.....	5
2 UM BREVE RESUMO SOBRE INTERFERÊNCIA.....	7
3 UMA REVISÃO DE NÚMEROS COMPLEXOS.....	11
4 UMA BREVE REVISÃO DE MATRIZES.....	12
5 ESPAÇOS VETORIAIS NA MECÂNICA QUÂNTICA.....	14
6 MEDIÇÕES LIVRES DE INTERAÇÃO EM UM INTERFERÔMETRO TIPO MACH-ZEHNDER (SEM OBJETO)	16
7 MEDIÇÕES LIVRES DE INTERAÇÃO, MACH-ZEHNDER COM OBJETO (CLÁSSICO)	22
REFERÊNCIA.....	26
APÊNDICE C.....	27

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Tocantins a todo o suporte dado para a efetivação deste produto educacional, ao Mestrado Profissional em Ensino de Física, da Sociedade Brasileira de Física. Destacamos ainda que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. E agradeço também aos professores do colegiado de física da Universidade Federal do Tocantins (campus Araguaína) pelo empenho e dedicação nesse mestrado, possibilitando um desenvolvimento educacional em todas as regiões do Brasil.

LISTA DE SIGLAS

MQ – Mecânica Quântica

ENEM – Exame Nacional do Ensino Médio

FC – Física Clássica

FQ – Física Quântica

INTRODUÇÃO

Este produto faz parte da dissertação de mestrado com o objetivo de auxiliar professores que estejam ministrando aulas de física no terceiro ano do ensino médio, e que se interesse em ministrar aulas sobre a Física Quântica (FQ). Estritamente, propõe-se uma Sequência Didática para ensinar tópicos da Mecânica Quântica (MQ), sendo um deles sobre o interferômetro de Mach-Zehnder com experimentações teóricas (cálculos matemáticos envolvendo conceitos e definições da física). Após sete anos ministrando aula de física na rede estadual de ensino do Estado do Tocantins, e tentativas frustradas na inserção da MQ, seja por falta de materiais específicos sobre o tema ou por não serem cobrados nos vestibulares ou pelo próprio ENEM, se observa a necessidade urgente da inserção destes tópicos para que possamos proporcionar aos alunos uma integração com todo o aparato tecnológico que encontramos no dia a dia. É fundamental ressaltar que mesmo não sendo cobrado nas seleções para os cursos superiores, é necessário reconhecer que o desenvolvimento da física está acontecendo nos dias atuais de maneira bem mais rápida e que estes temas da física quântica estão no nosso cotidiano. É com essa motivação que produzimos um material que insira tópicos de Física Quântica, possibilitando um interesse maior dos alunos durante as aulas. Adicionado a isto, constatamos que os livros didáticos adotados pelo Ministério da Educação (BEATRIZ, 2010; TORRES et al., 2016; GUALTER; NEWTON; HELOU, 2016) apresentam alguns pontos da Física Quântica de forma incompleta, fora do contexto histórico e confusa. Este produto busca a inserção de tópicos da física quântica na educação básica, sendo justificada a sua importância ao volume de aplicações que nos deparamos cotidianamente. Nesse contexto, é indispensável que o aluno do ensino médio conheça os princípios básicos da tecnologia atual, pois provavelmente ela poderá definir o seu futuro profissional (OSTERMANN; MOREIRA, 2001; TERRAZAN, 1992).

O debate em alguns pontos da FQ nessa sequência didática foi feito através de experimentações teóricas realizadas com uma linguagem matemática acessível e com símbolos de nível superior, porém de possível entendimento dos estudantes do ensino médio. Dessa maneira, possibilita-se um descobrimento já na educação básica de símbolos e significados físicos que a matemática da mecânica clássica não viabiliza. O uso teórico da mecânica quântica é uma estratégia viável, devido às escolas da rede pública geralmente não possuírem laboratórios equipados e disponíveis, esses fenômenos discutidos na FQ são relacionados principalmente à escala atômica, devido a

isso fica muito mais dificultosa a montagem de experimentos de baixo custo em sala de aula.

É notório que nos últimos anos há um empenho em desenvolver alguns experimentos de baixo custo para esta finalidade. Contudo, nossas escolas estão em dificuldades financeiras e estruturais para implementar um projeto deste tipo. Considerando que o desenvolvimento teórico através de “novos” cálculos matemáticos, conceitos e definições físicas para esses estudantes possa culminar em uma física que motive e discuta novas aplicabilidades não conhecidas e novas ideias das tecnologias atuais.

A Física Quântica quase não é vista ou sequer apresentada no ensino médio. É por isso que utilizaremos as teorias de aprendizagem de Ausubel, pois a aprendizagem significativa representa um processo no qual o indivíduo busca e adquire informações, onde a nova informação construída pelo aluno assume um significado por meio de sua estrutura cognitiva. A aprendizagem mecânica é o que aplicaremos no primeiro momento, pois os alunos nunca estudaram física quântica na vida. É importante destacar que apresentaremos aos discentes conceitos abstratos não preexistentes na sua estrutura cognitiva. No processo de maturação dos conceitos, leis e fórmulas da aprendizagem mecânica, observaremos o armazenamento das informações de forma aleatória e a não ocorrência de uma interligação entre o novo e o já existente. As teorias de Ausubel afirmam que há um processo continuado em que a aprendizagem mecânica pode se tornar significativa. Neste produto observaremos com detalhes essa passagem (AUSUBEL, 1980; MOREIRA, 2013).

O entendimento em torno da física clássica dominante nos currículos do ensino médio até hoje, é que ela se estende até o século XIX. A maioria dos fenômenos que acontecem no dia a dia tais como, o movimento dos corpos macroscópicos, a óptica e a eletricidade são temas relacionados à FC. Entretanto, a partir de 1850, a FC começou a ser questionada quanto às explicações de dados relacionados à difração de elétrons, à emissão de corpos aquecidos, modelos atômicos e o efeito fotoelétrico. Ao perceber que a FC falhava na explicação de alguns fenômenos, fez-se necessário várias transformações no desenvolvimento de novos conceitos físicos. Consequentemente nascia a Física Moderna. A partir de 1900, surgia um novo conceito físico, a Física Quântica (FQ), onde o centro do estudo são os sistemas físicos que possuem dimensões próximas ou abaixo da escala atômica, isto é, com o intuito de entender os fenômenos relativos às moléculas, átomos e partículas subatômicas.

Em muitos aparelhos eletrônicos que observamos no cotidiano vemos a FQ presente, por exemplo, em dispositivos eletrônicos, diodos, lasers, displays de cristal líquido, leitoras ópticas, dispositivos automáticos, dentre outros. No início do século XX a FQ surgia, mas somente nas últimas décadas começou a ser acrescentado no ensino de física e nos currículos das escolas de nível médio do Brasil (OSTERMANN, 2001). Portanto, o material apresentado tem um objetivo de construir uma sequência didática que possibilite a inserção de conteúdo do ensino médio de alguns conceitos básicos de MQ, permitindo uma abordagem inovadora e capaz de minimizar os problemas enfrentados pelos professores da Educação Básica. O interferômetro de Mach-Zehnder também é um exemplo da MQ, pois a precisão de seus experimentos e suas aplicabilidades são de extrema importância para o descobrimento de muitos processos tecnológicos atuais.

1 TÓPICOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

- A mecânica quântica em conjunto com a teoria quântica de campos são formulações fundamentais da física na escala atômica e subatômica.
- Na teoria quântica de campos associa-se a discretização do campo a uma partícula.
- As unidades das escalas atômicas mais utilizadas na física para as grandezas da ordem do átomo, são o nanômetro ($10^{-9} m$) e o ângstrom ($10^{-10} m$).
- Em escalas macroscópicas, a física clássica pode ser derivada a partir da mecânica quântica.
- Na física clássica, o estado de uma partícula pode ser definido pela posição e seu momento (o produto da massa por sua velocidade). Utilizando essas duas grandezas, é possível estimar, em um determinado instante, os resultados de qualquer medida realizada sobre ela.
- Na física quântica, o elétron, próton, nêutron, fóton, dentre outras partículas, não é possível prever com certeza o resultado de qualquer medida realizada sobre ela. O

que se obtém são probabilidades de a medida fornecer os vários valores possíveis para as grandezas relevantes.

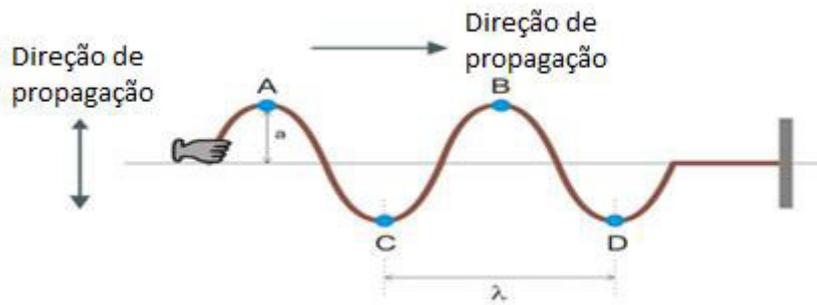
- Na mecânica quântica, grandezas como energia, momento linear, momento angular, e outras, podem assumir valores discretizados. Além disso, os objetos possuem simultaneamente características ondulatórias e corpusculares (dualidade onda-partícula).
- Dependendo das circunstâncias experimentais, a radiação parece ter um caráter ondulatório ou de partícula (fóton).
- Louis De Broglie (1892-1987) afirmava que se a energia radiante pudesse se comportar, sob condições apropriadas, como um feixe de partículas, a matéria, sob condições apropriadas, poderia possivelmente mostrar propriedades de uma onda.
- O caráter de partícula ou de onda de uma entidade física é complementar e não pode ser exibido ao mesmo tempo (princípio da complementaridade de Bohr).
- O físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976) concluiu que a natureza dual da matéria coloca uma limitação fundamental em como podemos determinar precisamente a posição e o momento de qualquer objeto.
- A limitação torna-se importante apenas quando trabalhamos com matéria em nível subatômico.
- O princípio da incerteza de Heisenberg, quando aplicado aos elétrons em um átomo, afirma que é inerentemente impossível nós sabermos de maneira simultânea tanto o exato momento do elétron quanto sua posição específica no espaço (EISBERG, 1979).
- A primeira formulação sólida da mecânica quântica foi denominada mecânica matricial.
- A formulação ondulatória de Schrödinger foi criada em 1926 (Nobel de Física em 1933). Essa formulação tem como base uma equação que descreve como o estado quântico de um sistema físico evolui no tempo.

- A mecânica quântica e sua rigorosa formulação matemática é devida a Paul Dirac, David Hilbert (matemático alemão), Erwin Schrödinger, Albert Einstein e outros.
- Na mecânica quântica, a noção de que todas as variáveis dinâmicas do sistema possuem valores bem definidos em cada instante de tempo é descartada.
- Os postulados da mecânica quântica são fundamentados em verdades que não são provadas.
- Na mecânica quântica, um espaço físico é representado por um vetor de estado em um espaço vetorial complexo. Segundo Paul Dirac, esse vetor pode ser dado pelo ket $|\alpha\rangle$ (representado por uma matriz coluna).
- O estado quântico, quando especificado, pode ser descrito por um vetor de estado. Vetores de estado quântico têm um significado físico, onde as probabilidades podem ser calculadas a partir deles.
- Postula-se que o ket contém a informação sobre o estado físico do sistema em estudo.

2 UM BREVE RESUMO SOBRE INTERFERÊNCIA

- A interferência é representada pela superposição de duas ou mais ondas em uma região do espaço.
- A interferência construtiva ocorre quando há um reforço das ondas, e a resultante é maior que a amplitude das componentes individuais.
- A interferência destrutiva ocorre quando há um cancelamento em cada ponto e a amplitude resultante é próximo de zero.
- A crista é definida como a altura da onda em relação à linha horizontal (com amplitude a) e o vale é a defasagem da onda em relação à linha horizontal.

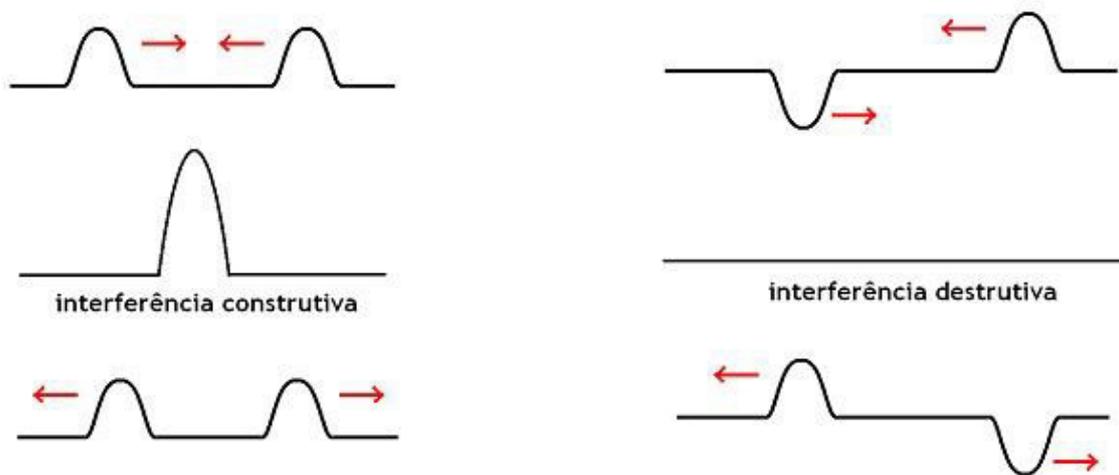
Figura 1 – Representação da propagação de uma onda.



Fonte: “adaptado de” Ramalho (2007, p. 422).

- A interferência construtiva é quando um vale de uma onda encontra outro vale, assim pode ocorrer a duplicação de sua amplitude, o mesmo ocorre quando uma crista de uma onda coincide com outra.

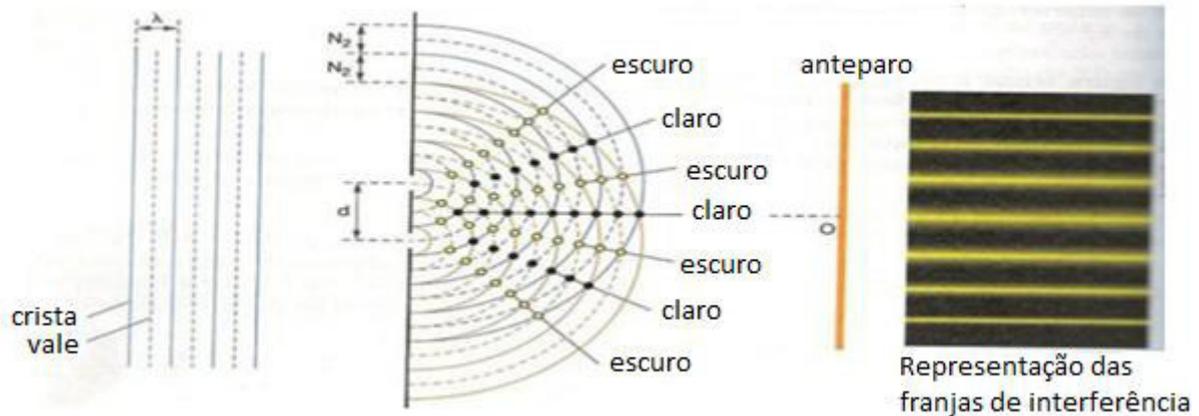
Figura 2 - Ilustração da superposição de ondas construtivas e destrutivas.



Fonte: “adaptado de” Ramalho (2007, p. 450).

- Nas franjas claras, ocorre interferência construtiva e existe um reforço das ondas.
- Nas franjas escuras, as ondas se anulam e ocorre interferência destrutivamente.
- Nas áreas adjacentes às franjas claras e escuras, a intensidade da luz varia gradualmente entre as franjas.

Figura 3 - Ilustração das interferências, franjas claras e escuras no anteparo.

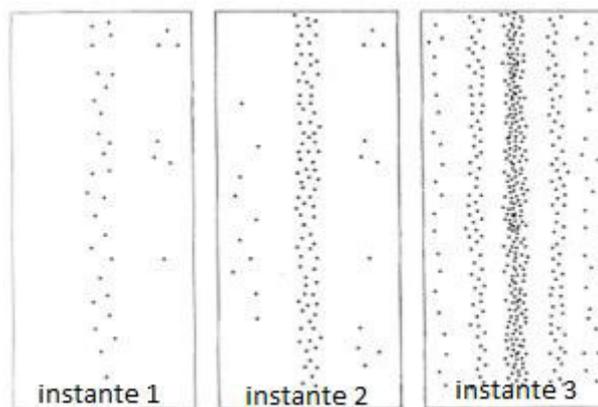


Fonte: "adaptado de" Benigno e Xavier (2016).

- Em uma visão mais direcionada ao interferômetro, a interferência descreve o fóton seguindo por duas trajetórias distintas simultaneamente como se estivesse viajando pelos dois caminhos ao mesmo.
- No modelo quântico, o fóton é uma partícula de luz indivisível que pode ser refletido ou transmitido em um espelho semitransparente.
- No jargão da mecânica quântica, dizemos que o fóton está em um estado de superposição quântica.
- O fóton é um objeto quântico que pode percorrer dois caminhos simultaneamente.
- O interferômetro de Mach-Zehnder é um arranjo experimental óptico inventado por Ludwig Mach (1868-1949), filho do ilustre teórico Ernest Mach, e pelo físico suíço Ludwig Zehnder (1854-1949), por volta dos anos 1890.
- Esse interferômetro foi proposto de maneira independente por Ludwig Zehnder em 1891 e Ludwig Mach em 1892.
- O interferômetro é um experimento que faz uso do fenômeno de interferência entre as ondas de luz, ou um meio de comprovar que a luz possui propriedades ondulatórias.

- Interferômetros são aparelhos que dividem um feixe de luz em dois, reunindo os dois feixes resultantes depois que cada um deles percorre um dos caminhos do equipamento.
- O experimento da dupla fenda, realizado por Thomas Young em 1801, pode ser considerado o primeiro interferômetro.
- Neste experimento, a fonte pode emitir um fóton de cada vez. A figura de interferência é obtida numa chapa fotográfica durante um longo tempo.

Figura 4 - Os fótons com as respectivas interferências.



Fonte: "adaptado de" Müller, (2002, p. 204).

- As franjas claras das figuras de interferência representam as regiões que os fótons têm maior probabilidade de acertar; as escuras representam aquelas que os fótons têm menor probabilidade de atingir.
- Essas regiões são determinadas pelos diferentes fatos que intervêm na experiência, como a frequência de radiação, a largura das fendas, a distância entre elas e a distância das fendas ao anteparo.
- A determinação dessas regiões é feita através de uma configuração estatística mais provável, bem determinada matematicamente.
- As franjas claras são determinadas quando os fótons colapsam na respectiva região.

- Nas vitrines das lojas observamos um exemplo de espelho semitransparente, pois vemos o interior da loja bem como uma reflexão parcial da nossa imagem.
- Interferômetros também operam em partículas corpusculares, pois a onda associada à partícula produz interferência.
- O interferômetro possui uma sensibilidade tanto maior quanto menor for o comprimento de onda do objeto quântico.
- Interferômetros podem ser extremamente precisos, úteis para navegação interestelar, para a medida de constantes fundamentais e para aplicações em prospecção geológica e mineral.
- Por exemplo, esse tipo de interferômetro permitiria a medida do campo gravitacional na superfície da Terra com precisão suficiente para detectar poços de petróleo.

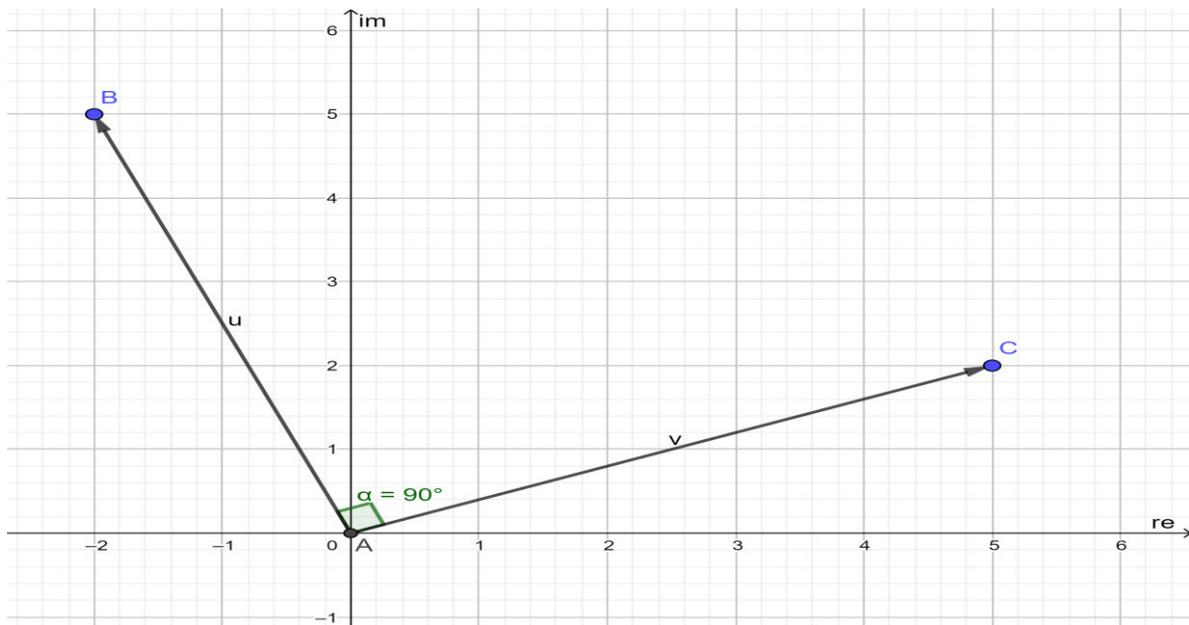
3 UMA REVISÃO DE NÚMEROS COMPLEXOS

- Um número complexo pode ser definido como um vetor que contém um par ordenado de valores no plano dos números complexos (a parte real e a parte imaginária).
- Assim, um número complexo, que chamamos de z , é representado por $z = a + bi$, chamamos a de parte real, e b de parte imaginária. Esta notação é chamada de forma algébrica.
- Quando nos deparamos com $x = \sqrt{-1}$, como não existe raiz quadrada de número negativo no conjunto dos números reais, convencionou-se $i^2 = -1$ para representar esse número com raiz negativa. O número i é representado como unidade imaginária.
- Os números complexos são úteis para realizar operações geométricas com vetores.

- Multiplicar por i corresponde a girar 90° , no sentido positivo ao redor da origem, a imagem do complexo pelo qual se multiplica i .
- Seja $u = v \cdot i$, sendo $v = 5 + 2i$, então

$$u = (5 + 2i)i = 5i + 2i^2 = -2 + 5i.$$

Figura 5 – Demonstração gráfica correspondente ao giro do vetor.



- O leitor interessado em aprender mais sobre números complexos pode consultar a referência do livro Giovane, Bonjorno (2001).

4 UMA BREVE REVISÃO DE MATRIZES

- Nas matrizes, cada número é chamado elemento da matriz, as filas horizontais chamadas de linhas (m) e as verticais de colunas (n).
- Uma matriz A do tipo $m \times n$ é representada por

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

- Matriz linha: é toda matriz do tipo $1 \times n$, isto é, com uma única linha.

$$A = (4 \quad 7 \quad -3 \quad 1)_{1 \times 4}$$

- Matriz coluna: É toda matriz do tipo $n \times 1$, isto é, com uma única coluna.

$$B = \begin{pmatrix} 4 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Matriz quadrada: É toda matriz do tipo $n \times n$, isto é, com o mesmo número de linhas e colunas. Neste caso, dizemos que a matriz é de ordem n .

$$C = \begin{pmatrix} 4 & 7 \\ 2 & -1 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} 4 & -1 & 0 \\ 0 & \pi & \sqrt{3} \\ 2 & 7 & 3 \end{pmatrix}$$

- Seja uma matriz quadrada de ordem n .
- Exemplo de adição de matrizes:

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 \\ 0 & 7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+2 & 4+(-1) \\ 0+0 & 7+2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 3 \\ 0 & 9 \end{pmatrix}.$$

- Exemplo de multiplicação de uma matriz por um número real:

$$3 \cdot \begin{pmatrix} 2 & 7 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \cdot 2 & 3 \cdot 7 \\ 3 \cdot (-1) & 3 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 21 \\ -3 & 0 \end{pmatrix}.$$

- Exemplo de multiplicação de matrizes, demonstrando que uma matriz $A \cdot B \neq B \cdot A$:

- Sendo as matrizes $A = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 2 \end{pmatrix}$ e $D = \begin{pmatrix} 2 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$, temos:

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \cdot 1 + 3 \cdot 3 & 2 \cdot 2 + 3 \cdot 4 \\ 4 \cdot 1 + 1 \cdot 3 & 4 \cdot 2 + 1 \cdot 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2+9 & 4+12 \\ 4+3 & 8+4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 & 16 \\ 7 & 12 \end{pmatrix},$$

$$B \cdot A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & 3 \\ 4 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 2 + 2 \cdot 4 & 1 \cdot 3 + 2 \cdot 1 \\ 3 \cdot 2 + 4 \cdot 4 & 3 \cdot 3 + 4 \cdot 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 + 8 & 3 + 2 \\ 6 + 16 & 9 + 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & 5 \\ 22 & 13 \end{pmatrix},$$

$$C \cdot D = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 2 + i \cdot i & i + i \\ 2i + 2i & i \cdot i + 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 + i^2 & 2i \\ 4i & i^2 + 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2i \\ 4i & 1 \end{pmatrix}.$$

5 ESPAÇOS VETORIAIS NA MECÂNICA QUÂNTICA

- Na formulação abstrata da mecânica quântica dizemos que $|\psi\rangle$ é um vetor num espaço de Hilbert.
- O nome "vetor" é devido à aparência com as quantidades que se comportam como flechas no plano ou no espaço físico. A propósito, os espaços vetoriais da mecânica quântica são, geralmente, de dimensões infinitas, e são então chamados de espaços de Hilbert. David Hilbert foi um Matemático alemão (1862-1943).
- Em mecânica quântica, representamos geralmente os vetores pelos símbolos bra $\langle |$ ou ket $| \rangle$, inventados por Paul Dirac.
- A seguir veremos as propriedades de um espaço vetorial satisfeitas por seus elementos, chamados de vetores.
- Vetores podem ser adicionados e sua soma é também um vetor,

$$|x\rangle + |y\rangle = |z\rangle.$$

- A adição é comutativa,

$$|x\rangle + |y\rangle = |y\rangle + |x\rangle.$$

- A adição é associativa,

$$(|x\rangle + |y\rangle) + |z\rangle = |x\rangle + (|y\rangle + |z\rangle).$$

- Para cada vetor $|x\rangle$ há um vetor negativo $|y\rangle$ (ou $| - x\rangle$), tal que

$$|x\rangle + |y\rangle = 0.$$

- Vetores podem ser multiplicados por escalares a , b . O resultado também é um vetor. Se $|x\rangle$ for um vetor, então $a|x\rangle$ também é um vetor.
- Os escalares podem ser números reais ou complexos. No espaço vetorial Hilbert da mecânica quântica, os escalares são números complexos.
- A multiplicação por escalar é associativa,

$$a(b|x\rangle) = (ab)|x\rangle.$$

- Vale a lei distributiva,

$$(a + b)|x\rangle = a|x\rangle + b|x\rangle.$$

- Na Mecânica Quântica, o estado de um sistema físico será representado por um vetor abstrato pertencente a um espaço vetorial complexo. Veremos, a seguir, mais detalhes das operações com os vetores das matrizes colunas (NOVAIS, 2016).
- Vamos considerar os vetores matrizes colunas $|a\rangle$ e $|b\rangle$,

$$|a\rangle = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}, \quad |b\rangle = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}.$$

- Realizando a adição entre dois vetores, $|a\rangle$ e $|b\rangle$, e a multiplicação por um escalar $\alpha \in \mathbb{C}$, temos

$$|a\rangle + |b\rangle = \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ a_2 + b_2 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix}, \quad \alpha|a\rangle = \begin{pmatrix} \alpha a_1 \\ \alpha a_2 \\ \vdots \\ \alpha a_n \end{pmatrix}.$$

- É instantâneo verificar que o conjunto das matrizes colunas acima definido constitui um espaço vetorial sobre o conjunto dos números complexos.
- O postulado fundamental da mecânica quântica diz que o estado de um sistema quântico é matematicamente representado por um ket normalizado $|\alpha\rangle$.
- Superposição: Um fóton em superposição pode ser descrito matematicamente por $|\alpha\rangle = a|1\rangle + b|2\rangle$, onde $|1\rangle$ e $|2\rangle$ representam, neste caso, diferentes trajetórias.
- $|1\rangle$ e $|2\rangle$ são conhecidos como base ortonormal e são representados por

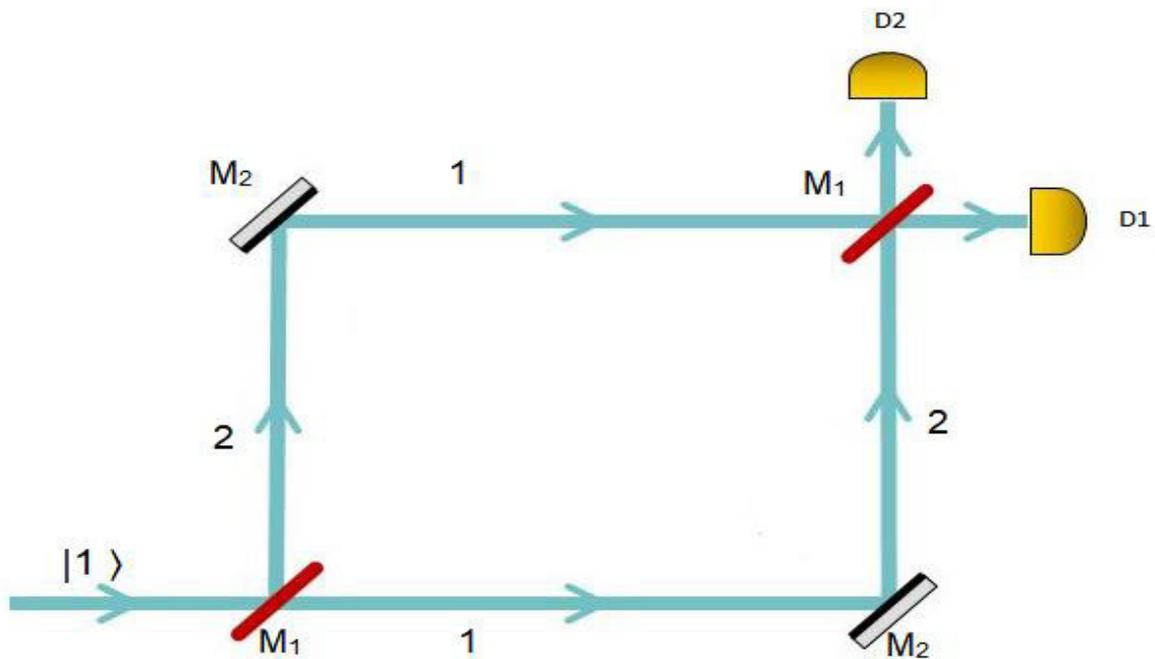
$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

- Uma base ortonormal é constituída por vetores ortogonais com módulo 1.
- O primeiro espelho semitransparente posiciona o fóton em uma superposição de dois estados, $|1\rangle$ que representa o caminho 1, e $|2\rangle$ que representa o caminho 2.

6 MEDIÇÕES LIVRES DE INTERAÇÃO EM UM INTERFERÔMETRO TIPO MACH-ZEHNDER (SEM OBJETO)

- A Figura 6 ilustra o interferômetro tipo Mach-Zehnder.
- M_1 = espelhos semi-transparentes (refletem e transmitem 50%).
- M_2 = espelhos (refletem 100%).
- $|1\rangle$ = estado do fóton movendo-se para a direita.
- $|2\rangle$ = estado de um fóton movendo-se para cima.

Figura 6 – Interferômetro sem objeto obstruindo.



Fonte: “adaptado de” Müller, (2002, p. 203).

- A mecânica quântica opera com cálculo de matrizes.
- O fóton entra no Interferômetro tipo Mach-Zehnder devidamente alinhado.
- Há dois detectores no interferômetro, D_1 e D_2 .
- A interferência é construtiva no detector D_1 e destrutiva no detector D_2 .
- No estudo do comportamento ondulatório da luz, os detectores D_1 e D_2 são substituídos por anteparos. No estudo do comportamento corpuscular, os detectores são essencialmente contadores de fótons.
- É interessante perceber que o efeito básico deste experimento está relacionado à fase da onda, ou seja, o primeiro semiespelho sempre deixa passar metade da luz e reflete a outra metade (ELITZUR, 1993).
- A matriz referente à operação do espelho semitransparente M_1 no fóton representa a transformação de uma partícula que estava no estado $|1\rangle$ para uma superposição dos estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$ e vale

$$M_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

- Os estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$ são representados pelas seguintes matrizes coluna:

$$|1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$|2\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

- Este experimento teórico será realizado considerando o estado inicial do fóton dado por $|1\rangle$.
- Aplicando a matriz do espelho semitransparente M_1 no estado do fóton $|1\rangle$, significa depois que o fóton passa do primeiro espelho semitransparente M_1 , obtemos

$$M_1|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (4)$$

- Expandindo o resultado da forma matricial da equação (4) por meio das matrizes colunas dos estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$, argumentos (2) e (3), obtém-se a soma dos kets

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right].$$

- Colocando em evidência $\frac{1}{\sqrt{2}}$, observamos que nessa expressão há os estados dos kets $|1\rangle$ e $|2\rangle$, equações (2) e (3), sendo o estado $|2\rangle$ multiplicado pelo número complexo i . Assim, chegamos na superposição,

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i |2\rangle \}. \quad (5)$$

- A equação (5) significa a superposição do estado do fóton $|1\rangle$, no primeiro espelho semitransparente M_1 .
- Aplicando o primeiro espelho semitransparente M_1 no estado do fóton $|2\rangle$, temos

$$M_1|2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

- O estado $|2\rangle$ se transforma na seguinte superposição:

$$|2\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ i|1\rangle + |2\rangle \}. \quad (7)$$

- A diferença entre a equação (5) e (7) é o número complexo multiplicado pelo estado do fóton, que representa a passagem do fóton em cada “braço” do interferômetro depois que ele é refletido e transmitido pelo primeiro espelho semitransparente.
- A matriz que opera no espelho de reflexão total M_2 (100%) é dada por

$$M_2 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

- Aplicando a matriz que opera no espelho de reflexão total M_2 no resultado do argumento (4), obtemos

$$M_2 \cdot M_1|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ i \end{pmatrix}. \quad (9)$$

- Isso significa que a superposição do estado $|1\rangle$, após o primeiro espelho semitransparente e o espelho de reflexão total, é

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i|2\rangle \} \xrightarrow{M_2} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ -|1\rangle + i|2\rangle \} \quad (10)$$

- Depois que o estado inicial do fóton, dado por $|1\rangle$, passa pelos dois espelhos (o primeiro espelho semitransparente M_1 e o espelho de reflexão total M_2), aplica-se finalmente o segundo espelho semitransparente M_1 no resultado do argumento (9), observando que a matriz do primeiro e segundo espelhos semitransparentes são iguais, temos o resultado a seguir,

$$M_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

- Assim, teremos o resultado do trajeto do fóton em todo o processo do interferômetro, dado por

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i |2\rangle \} \xrightarrow{M_2} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ -|1\rangle + i |2\rangle \} \xrightarrow{M_1} -|1\rangle. \quad (11)$$

- A equação (11) representa a superposição do estado do fóton $|1\rangle$ desde o primeiro espelho semitransparente até o colapso no detector D_1 .
- Pela forma como o experimento foi realizado, depois que o fóton passa por todos os espelhos, teremos o estado $-|1\rangle$, ou seja, só vai ter fóton para a direita e somente o detector 1 vai clicar (colapsar).
- O sinal negativo não afeta o resultado, porque a amplitude quando é calculada a sua probabilidade é elevada ao quadrado, então é só um fator de fase da onda e não altera a probabilidade.
- Colapsar significa entre as várias probabilidades de estado que o objeto tem, somente um é medido.
- Quando uma onda quântica colapsa, por exemplo, ela se manifesta como partícula.
- Multiplicando as matrizes que operam no interferômetro, obtemos:

$$N = M_1 \cdot M_2 \cdot M_1,$$

$$N = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix},$$

$$N = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & i \\ i & -1 \end{pmatrix},$$

$$N = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 - 1 & i - i \\ -i + i & -1 - 1 \end{pmatrix},$$

$$N = - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$N|1\rangle = -|1\rangle. \tag{12}$$

- A equação (12) faz a combinação de todos os espelhos de modo que a matriz identidade é negativa.
- Aplicando N em $|1\rangle$, temos que

$|1\rangle$ é o estado inicial antes de passar pelos espelhos,

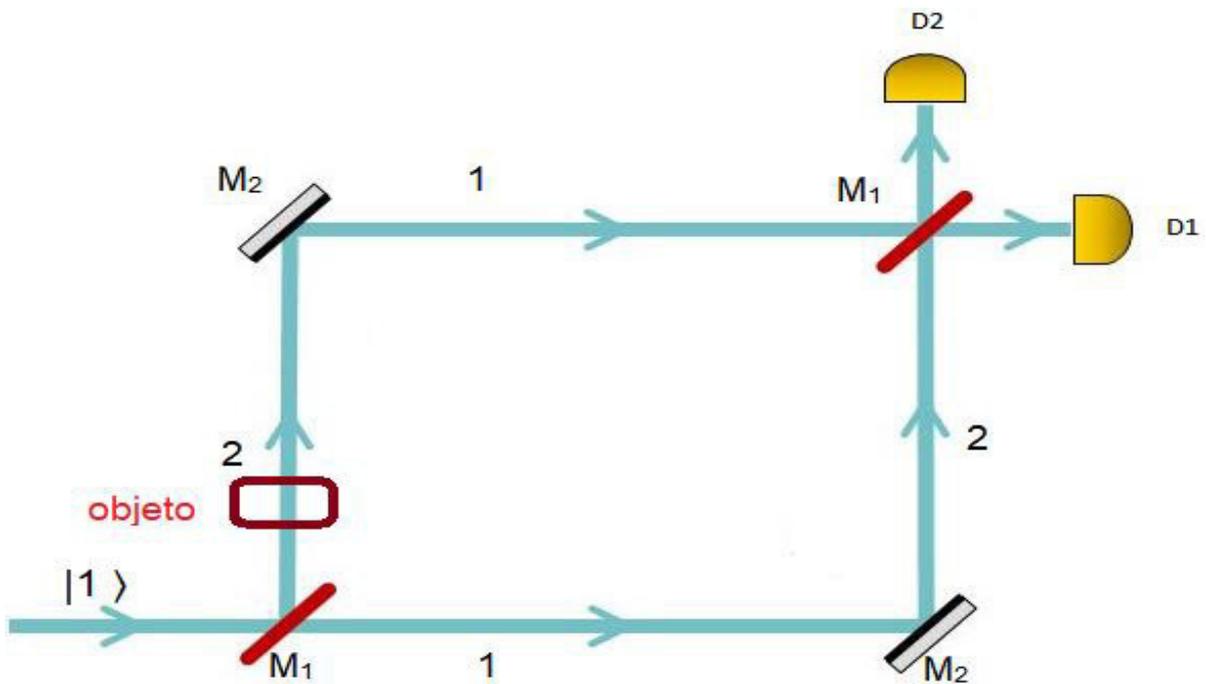
$-|1\rangle$ é o estado final após passar pelos espelhos.

7 MEDIÇÕES LIVRES DE INTERAÇÃO, MACH-ZEHNDER

COM OBJETO (CLÁSSICO)

- Vamos considerar os cálculos do argumento (1) até o (11), agora com um objeto clássico obstruindo um dos caminhos.

Figura 7 - Interferômetro com objeto clássico obstruindo um dos caminhos.



Fonte: "adaptado de" Müller, (2002, p. 203).

- Após o espelho semitransparente M_1 , as equações (4) e (5) podem ser reescritas como

$$M_1 |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$|1\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i |2\rangle \}. \quad (14)$$

- Quando o estado $|2\rangle$ é espalho, $|2\rangle \rightarrow |\text{espalhado}\rangle$, significa que existe um objeto obstruindo um dos caminhos do fóton.
- A atuação de M_2 no estado $|1\rangle$ resulta em

$$M_2|1\rangle = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix} = i \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

- O argumento (15) representa a superposição do estado $|1\rangle$ após o espelho de reflexão total M_2 ,

$$|1\rangle \xrightarrow{M_2} i|2\rangle. \quad (15)$$

- Após o espelho de reflexão total M_2 (100%), temos as seguintes superposições:

$$\begin{aligned} |1\rangle &\xrightarrow{M_2} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |1\rangle + i|2\rangle \} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ i|2\rangle + i|\text{espalhado}\rangle \} \\ &= \frac{i}{\sqrt{2}} \{ |2\rangle + |\text{espalhado}\rangle \} \end{aligned} \quad (16)$$

- Aplicando a matriz do primeiro espelho semitransparente M_1 no estado $|2\rangle$, ele se transforma em

$$M_1|2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$|2\rangle \xrightarrow{M_1} \frac{1}{\sqrt{2}} \{ i|1\rangle + |2\rangle \}. \quad (18)$$

- Os argumentos (6) e (7) estão reescritos nas equações (17) e (18).
- Aplicando a propriedade distributiva na equação (18) e substituindo o resultado do estado do fóton $|2\rangle$ da mesma no argumento (16), obtemos

$$\begin{aligned} \frac{i}{\sqrt{2}} \{ |2\rangle + |\text{espalhado}\rangle \} &\rightarrow \frac{i}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{i}{\sqrt{2}} |1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |2\rangle + |\text{espalhado}\rangle \right\} \\ &= -\frac{1}{2} |1\rangle + \frac{i}{2} |2\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}} |\text{espalhado}\rangle. \end{aligned} \quad (19)$$

- Resumindo, temos as seguintes operações de superposições, descritas nos itens a seguir.
- O estado $|1\rangle$, operando no primeiro espelho semitransparente $M_1 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}\{|1\rangle + i|2\rangle\}$, em seguida atuando no espelho de reflexão total $M_2 \rightarrow \frac{i}{\sqrt{2}}\{|2\rangle + i|\text{espalhado}\rangle\}$, e finalmente operando no segundo espelho semitransparente M_1 , obtemos como resultado final

$$M_1 \rightarrow -\frac{1}{2}|1\rangle + \frac{i}{2}|2\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}}|\text{espalhado}\rangle.$$

- Elevando ao quadrado as amplitudes de cada estado da equação (19), obtemos as respectivas probabilidades dos estados $|1\rangle$, $|2\rangle$ e $|\text{espalhado}\rangle$.
- A probabilidade do fóton colapsar no estado $|1\rangle$ é dada por

$$P_1 = \left(-\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4},$$

$$|1\rangle \rightarrow \frac{1}{4} (25\%).$$

- A probabilidade do fóton colapsar no estado $|2\rangle$ é dada por

$$P_2 = \left(\frac{i}{2}\right)^2 = \frac{1}{4},$$

$$|2\rangle \rightarrow \frac{1}{4} (25\%).$$

- A probabilidade do fóton ser espalhado é dada por

$$P_e = \left(\frac{i}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2},$$

$$|\text{espalhado}\rangle \rightarrow \frac{1}{2} (50\%).$$

- Este interferômetro é arranjado de tal maneira que um dos caminhos do fóton passa pelo local onde o objeto clássico (Fig. 7) está presente. Um único fóton passa pelos “braços” do interferômetro. Existem três resultados possíveis para essa medição: (1) clicar no detector D_1 , (2) clicar no detector D_2 , (3) espalhar no objeto clássico que obstrui um dos caminhos.
- Observa-se pela probabilidade P_2 que D_2 clica, isto é, colapsa em $|2\rangle$. Isso significa que podemos garantir que existe um objeto clássico obstruindo um dos caminhos, mesmo sem interagir com ele, pois no caso sem o objeto, D_2 nunca clicava.
- De acordo com a realização dos cálculos desse interferômetro (com objeto clássico obstruindo um dos caminhos), observa-se que o fóton em um dos caminhos foi espalhado pela obstrução do objeto clássico e nenhum detector irá clicar neste caso.

REFERÊNCIAS

AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. **Psicologia educacional**. Interamericana, 1980. 92 p.

BEATRIZ, A.M. A. **Curso de Física**. 3 ed. São Paulo: Saraiva, v. 3, 2010. 218 p.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 1979, 97 p.

ELITZUR, Avshalom.; VAIDMAN Lev. Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements. **Foundations of physics**, v. 23, p. 987,1993.

GUALTER; NEWTON; HELOU. **Física**. 3 ed. São Paulo: Saraiva, v. 3, 2016. 250–251 p.

GIOVANNI; BONJORNO. **Matemática uma nova abordagem**. São Paulo: Editora FTD, v.3, 2001. 148 p.

MULLER, T. Teaching Quantum Mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 200–209, 2002.

NOVAIS, STUDART. **Mecânica quântica básica**. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016. 106 p.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 18, n. 2, p. 135–151, 2001.

RAMALHO, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. d. T. **Os Fundamentos da Física**. 7. ed.: São Paulo: Moderna, v.2, 2007, 422, 450 p.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209–214, 1992.

TORRES, C. M. A. et al. **Física Ciência e Tecnologia**. 4 ed. São Paulo: Editora Moderna, v.3, 2016. 206 p.

APÊNDICE C

AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM

Nesta seção apresentamos uma avaliação que representa no processo de ensino e aprendizagem um elemento importante na análise dos tópicos de Física Quântica trabalhados através desta sequência didática. A avaliação mostra o nível do trabalho do professor e também o aprendizado do aluno. Neste produto educacional feito em forma de sequência didática, esta seção será utilizada com aspectos qualitativos e quantitativos.

QUESTÕES

- 1) Por que utilizamos números complexos na mecânica quântica?
- 2) Por que a mecânica quântica não pode ser completamente derivada a partir da física clássica?
- 3) Qual o significado do símbolo matemático $|\text{ket}\rangle$?
- 4) Se o fóton é uma partícula de luz indivisível, o que ocorre quando esta passa pelo primeiro espelho semitransparente.
- 5) Quando o estado do fóton colapsa em um dos detectores no interferômetro de Mach-Zehnder, qual seu significado?
- 6) Qual o significado físico das medições livres de interação no interferômetro de Mach-Zehnder, quando não há objeto e quando há objeto obstruindo um dos caminhos do fóton?
- 7) De acordo com essa superposição proposta $-\frac{1}{2}|1\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|2\rangle$, qual a probabilidade do fóton colapsar nos estados $|1\rangle$ e $|2\rangle$.
- 8) Em um interferômetro onde existe um objeto obstruindo um dos caminhos, calcule a probabilidade do estado espalhado, considerando que o estado do sistema é

$$-\frac{1}{2\sqrt{2}}|1\rangle + \frac{\sqrt{3}}{2}|2\rangle + \frac{i}{2\sqrt{2}}|\text{espalhado}\rangle$$

9) Quando o fóton representado por $|1\rangle$, no experimento teórico das medições livres de interação sem objeto, passa por todos os espelhos e colapsa no detector D_1 , que tipo de interferência podemos observar?

- a) Interferência construtiva.
- b) interferência destrutiva.
- c) interferência livre.
- d) interferência de medida.
- e) estão corretas as alternativas a, b, c e d.

10) Qual tipo de interferência ocorre no detector D_2 seguindo o enunciado da questão 9?

11) Para praticar e entender melhor o que ocorre nos cálculos matemáticos realizados quando o estado do fóton é $|1\rangle$, realize os cálculos considerando que o estado do fóton inicial fosse $|2\rangle$.