

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DFIS/UEFS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 06**

Klinsmann Patrick dos Santos

**ENSINO DE EMARANHAMENTO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO
A PERSPECTIVA SOCIOINTERACIONISTA DE VYGOTSKY: UMA SEQUÊNCIA
DIDÁTICA PARTINDO DO CLÁSSICO PARA O QUÂNTICO**

Klinsmann Patrick dos Santos

**ENSINO DE EMARANHAMENTO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO
A PERSPECTIVA SOCIOINTERACIONISTA DE VYGOTSKY: UMA SEQUÊNCIA
DIDÁTICA PARTINDO DO CLÁSSICO PARA O QUÂNTICO**

Dissertação apresentada ao Polo 06 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Dr. Álvaro Santos Alves
Coorientador:
Dr. Rodolfo Alves de Carvalho Neto

Ficha catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

Santos, Klinsmann Patrick dos
S235e Ensino de emaranhamento quântico no Ensino Médio
utilizando a sociointeracionista de Vigotsky: uma sequência
didática partindo do clássico para o quântico/ Klinsmann
Patrick dos Santos. - 2023.
90f. : il.

Orientador: Álvaro Santos Alves
Coorientador: Rodolfo Alves de Carvalho Neto

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Feira de
Santana.

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2023.

1. Emaranhamento quântico. 2. Física - Ensino. 3. Vigotsky. 4.
Sequência didática. I. Alves, Álvaro Santos, orient. II. Carvalho
Neto, Rodolfo Alves de, coorient. III. Universidade Estadual de
Feira de Santana. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de
Física. IV. Título.

CDU: 530.145(07)

KLINSMANN PATRICK DOS SANTOS

**ENSINO DE EMARANHAMENTO QUÂNTICO NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO
A PERSPECTIVA SOCIOINTERACIONISTA DE VYGOTSKY: UMA SEQUÊNCIA
DIDÁTICA PARTINDO DO CLÁSSICO PARA O QUÂNTICO**

Dissertação apresentada ao Polo 06 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada em 07 de Fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Álvaro Santos Alves
Orientador
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

Prof. Dr. José Carlos Oliveira de Jesus
Examinador(a) 1
Universidade do Estado da Bahia - UNEB

Prof. Dr. Érico Gonçalves de Figueiredo
Examinador(a) 2
Universidade Federal do Recôncavo Baiano - UFRB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amado primogênito,
RAVI MIGUEL

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus quem me permitiu o dom da vida e a graças de realizar este trabalho. Agradeço a Nossa Senhora que passou à frente de toda situação difícil que lidei na caminhada acadêmica.

Agradeço ao prof^o Dr. Álvaro Santos Alves pela paciência e comprometimento durante todo o período de trabalho, sem você não conseguiria conquistar meu objetivo de vida. Agradeço ao prof^o Rodolfo Alves de Carvalho Neto pelos relevantes aprendizados durante todo percurso.

Agradeço ao prof Dr. José Carlos Oliveira de Jesus por me incentivar, ainda na graduação, a tratar do tema deste trabalho e suas excelentes provocações. Agradeço ao prof. Dr. Érico, integrante da banca examinadora, pelas contribuições significativas para minha formação. Estendo os agradecimentos a todos os professores que se dedicaram em partilhar o conhecimento científico tão importante para o crescimento pessoal e profissional.

Agradeço a minha mãe Arlete, meu pai Lucivado, meu irmão Kleison Bruno e toda minha família por sempre acreditar no meu potencial e não me deixar desistir. Agradeço aos amigos (as)/irmãs(ãos) de coração que sempre torceram por mim.

Agradeço aos colegas do curso: Samuel Cotrim, Gerson, Nilson e Geraldo. Obrigado pela parceria nestes dois anos de curso, mesmo no ensino remoto, estivemos sempre próximos. Gratidão! ‘

Agradeço a minha amada Jamile Anunciação por estar ao meu lado, compartilhando momentos felizes e os mais difíceis nesta jornada. Gratidão por me ajudar emocionalmente, principalmente durante a pandemia. Você fez toda diferença!

Agradeço ao Prof. Dr. Edcarlos *In Memoriam*, exemplo de ser humano e profissional. Jamais será esquecido por mim.

Agradeço ao MNPEF, à UEFS e a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para que lograsse êxito na caminhada acadêmica.

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

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma proposta de sequência didática para abordagem do emaranhamento quântico no Ensino Médio, bem como os resultados de uma intervenção pedagógica realizada com estudantes da 3ª série de uma unidade escolar da rede pública da cidade de Madre de Deus -BA, localizada na região metropolitana de Salvador, objetivando a introdução do tema EQ, bem como conceitos correlatos a temática. A SD foi elaborada a partir da perspectiva sociointeracionista de Vygotsky. Metodologicamente, a proposta consiste da utilização de mediadores semióticos (vídeos, simuladores, imagens e textos) e da mediação social (interação entre os sujeitos envolvidos nos processos de ensino e aprendizagem). Sendo assim, o tema foi escolhido por sua atualidade científica e pela presença maciça de tecnologias Digitais de informação e comunicação (TDIC) no cotidiano escolar, que potencializam o acesso e o uso destes mediadores semióticos em diferentes momentos e situações, permitindo aos alunos mediações sociais extraclasse. Dessa forma, as atividades da SD foram desenvolvidas visando o levantamento das concepções espontâneas dos alunos relativas a conceitos da MC e da MQ. Após a apresentação de cada vídeo, os alunos foram estimulados ao debate, mediado pelo professor. A utilização de vídeos como mediadores semióticos mostrou-se potencializadora dos debates entre os pares, já avaliação foi realizada através das respostas das questões norteadoras e situações-problemas utilizando um simulador virtual de emaranhamento e os vídeos de curta duração. Os dados foram transcritos e analisados buscando-se indícios de internalização do conceito do EQ. Vale ressaltar que os participantes da pesquisa tiveram um maior amadurecimento nas respostas e análises do simulador virtual no decorrer da SD, apesar de não apresentarem o domínio do emaranhamento, com isso houve uma construção, (res)significação do conceito físico da MQ. Uma conclusão que nos parece plausível é o fato de a utilização dos mediadores semióticos e sociais, associados a conceitos clássicos, como onda e partícula, permitiram agir na zona de desenvolvimento proximal dos participantes da pesquisa para que se apropriassem da ideia do emaranhamento quântico.

Palavras-chave: Emaranhamento Quântico, Vygotsky, Ensino de Física

ABSTRACT

In this work, a proposal for a didactic sequence (DS) is presented to approach quantum entanglement (EQ) in High School (EM), as well as the results of a pedagogical intervention carried out with 3rd grade students of a public school unit. from the city of Madre de Deus - BA, located in the metropolitan region of Salvador, aiming to introduce the EQ theme, as well as concepts related to the theme. The DS was elaborated from Vygotsky's sociointeractionist perspective. Methodologically, the proposal consists of the use of semiotic mediators (videos, simulators, images and texts) and social mediation (interaction between the subjects involved in the teaching and learning processes). massive presence of digital information and communication technologies (TDIC) in the school routine, which enhance the access and use of these semiotic mediators in different moments and situations, allowing students to have social mediations outside the classroom. Thus, SD activities were developed with a view to surveying the students' spontaneous conceptions regarding MC and QM concepts. After the presentation of each video, students were encouraged to debate, mediated by the teacher. The use of videos as semiotic mediators proved to enhance debates between peers, since the evaluation was carried out through the answers to the guiding questions and problem situations using a virtual entanglement simulator (IVMZ) and short videos. The data were transcribed and analyzed, looking for evidence of internalization of the EQ concept. It is worth mentioning that the research participants had a greater maturity in the responses and analyzes of the IVMZ during the DS, although they did not present the mastery of entanglement, with that there was a construction, (re)signification of the physical concept of MQ. A conclusion that seems plausible to us is the fact that the use of semiotic and social mediators, associated with classical concepts such as wave and particle, allowed the research participants to act in the zone of proximal development so that they could appropriate the idea of quantum entanglement.

Key words :. Quantum entanglement, Vygotsky, Physics teaching

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMC	Física Moderna e Contemporânea
EQ	Emaranhamento Quântico
MNPEF	Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física
MQ	Mecânica Quântica
IMZ	Interferômetro de Mach-Zehnder
IVMZ	Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder
EM	Ensino Médio
CEAB	Colégio Estadual Antônio Balbino
FC	Física Clássica
SD	Sequência Didática
MC	Mecânica Clássica
ZDP	Zona de Desenvolvimento Proximal
UEFS	Universidade Estadual de Feira de Santana
TDIC	Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS.....	13
2.1 BASES DA FÍSICA CLÁSSICA.....	14
2.2 DIFRAÇÃO, INTERFERÊNCIA E O EXPERIMENTO DE DUPLA FENDA.....	14
2.3 POLARIZAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA TRATAMENTO CLÁSSICO.....	18
2.4 FILTROS POLARIZADORES - TRATAMENTO CLÁSSICO.....	25
2.5 POSTULADOS E BASES DA MQ.....	27
2.6 QUANTIZAÇÃO DO CAMPO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	29
2.7 EXPERIMENTO DE DUPLA FENDA - REGIME QUÂNTICO - INTERPRETAÇÃO DA COMPLEMENTARIDADE.....	32
2.8 SUPERPOSIÇÃO QUÂNTICA, A EXEMPLO DO GATO DE SCHRODINGER.....	34
2.9 POLARIZAÇÃO DE FÓTONS INDIVIDUAIS.....	36
2.10 EMARANHAMENTO QUÂNTICO – ASPECTOS TEÓRICOS E CASOS EXEMPLARES.....	38
2.11 EMARANHAMENTO DE FÓTONS E O OSCILADOR PARAMÉTRICO ÓTICO (OPO).....	41
2.12 EMARANHAMENTO QUÂNTICO NO OSCILADOR PARAMÉTRICO ÓTICO VIRTUAL (OPOV).....	43
2.13 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO EQ.....	47
3.0 REFERENCIAL TEÓRICO - METODOLÓGICO - LEV VYGOTSKY.....	49
3.1 MARXISMO IMPLÍCITO NA TEORIA VYGOTSKIANA.....	50
3.2 MEDIAÇÕES SOCIAL E SEMIÓTICA - ZONAS DE DESENVOLVIMENTO.....	50
3.3 ENSINO DE EMARANHAMENTO QUÂNTICO.....	52
4. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O CONCEITO DE EMARANHAMENTO NA EDUCAÇÃO BÁSICA.....	54
4.1 ESTRATÉGIA DIDÁTICA.....	54
4.2 RELATO DE EXPERIÊNCIA - ANÁLISE SOBRE APLICAÇÃO DA SD.....	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
6. REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A –TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO.....	87
APÊNDICE B - TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO.....	88
APÊNDICE C - PRODUTO EDUCACIONAL.....	Error! Indicador Não Definido .

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física no Brasil passou por mudanças significativas no decorrer da história, isso se deu pela organização do sistema educacional estabelecido no país, como salienta MOREIRA (2018). Atualmente, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (BRASIL, 2018), bem como a LDB (Lei de diretrizes e Bases da educação brasileira) exercem grande influência a respeito dos conteúdos previstos para educação básica e o estabelecimento das normativas que determinam um caminho a ser percorrido em busca do “pleno desenvolvimento do educando, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho” (Art. 2º, Lei 9394/96), além disso, trazem também a necessidade dos estudantes em expandir seus níveis de conhecimento para uma leitura mais profunda acerca das novas tecnologias que, por sua vez, impactam diretamente no nosso cotidiano. Dito isto, MOREIRA (2018) ainda defende que o ensino de física deve ser pensado numa abordagem contextualizada com foco na motivação.

Nesse contexto, o ensino de física, nas escolas brasileiras, deve ser encarado como um desafio, principalmente acerca dos conteúdos e a concepção cultural do componente curricular, haja vista a maneira como é estabelecido: difícil e uma extensão da matemática, o que contribui para o afastamento dos estudantes. A fim de proporcionar uma ruptura com este cenário, OSTERMANN (2016) prevê a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, uma vez que estamos preparando alunos para uma sociedade moderna, essencialmente tecnológica. Vale salientar que de forma análoga, como ocorre o processo de avanço na comunidade científica, o ensino de física no EM deve avançar, inclusive tratando aspectos da evolução conceitual para compreensão de conceitos mais complexos. Sendo assim, é fundamental que os professores de Física busquem compreender estes tópicos para introdução mais efetiva e não apenas uma abordagem com boa vontade apoiada no senso comum (MOZENA e OSTERMANN, 2016).

Segundo BRASIL (2018), o currículo da educação básica deve priorizar o ensino interdisciplinar nas unidades escolares. Atualmente, entende-se por currículo o “projeto de formação (envolvendo conteúdos, valores/attitudes e experiências), cuja construção se faz a partir de uma multiplicidade de práticas inter-relacionadas através de deliberações tomadas nos contextos social, cultural (e também político e ideológico) e econômico”(PACHECO, 2005). Logo, a Física, como componente curricular, deve ser integrada nos projetos da escola. Por outro lado, MOZENA E OSTERMANN (2016) apontam a Física na periferia deste processo devido ao não entendimento do professor sobre o processo humano na construção do

conceito científico, a dificuldade no aprofundamento de conhecimentos e a falta de conexão entre os outros componentes curriculares.

Este trabalho propõe-se a inserção de um tópico da MQ no EM, mais especificamente o emaranhamento quântico. Ele foi escolhido pela sua relevância para o entendimento das novas tecnologias: computador quântico, criptografia quântica e nas novas redes de telecomunicação, assuntos esses que surgiram a partir das conversas com os estudantes de uma unidade de ensino da rede pública da Bahia sobre o funcionamento de alguns dispositivos. Convém dizer que o fenômeno do EQ é concebido, a princípio, de maneira complexa por tratar-se de conceitos que exigem um grau de abstração, o que acaba afastando os docentes em lidar com determinado tema em sala de aula.

Diante dessa realidade, pensamos uma sequência didática sobre o conceito físico do emaranhamento quântico utilizando as mediações social e semiótica, proposto por Vygotsky. A proposta deste trabalho resume-se em desenvolver e aplicar uma SD com alunos do ensino médio e analisar a eficácia em relação a aprendizagem do conceito de emaranhamento. Evidentemente, será possibilitado um material de apoio para que os professores de física da educação básica possam promover a aprendizagem do conceito de emaranhamento quântico, baseando-se na teoria sociointeracionista. Para tanto, é necessário que os alunos compreendam conceitos fundamentais da MC no tocante ao quadro teórico corpuscular e ondulatório, além de distinguir objetos clássicos e quânticos, descrever a superposição de estados quânticos, a exemplo do gato de schrodinger e reconhecer o emaranhamento entre fótons polarizados.

Vygostky (2008) advoga que o processo de desenvolvimento do indivíduo é marcado por mediações social e semiótica, pilares distintos e indissociáveis para concretizar o processo de desenvolvimento. Sendo assim, na SD utilizaremos alguns mediadores semióticos para possibilitar a aprendizagem do conceito do EQ, em outras palavras, um conjunto de recursos tecnológicos que proporcionam um novo modo de se comunicar, como vídeos e simuladores virtuais do fenômeno físico. Convém dizer que “ ao analisar a importância e o papel da TDIC no sistema educacional é preciso compreender que esse instrumento não substitui o professor, ou seja, é um equívoco esperar que o aluno aprenda o conceito físico apenas realizando a simulação virtual ou assistindo um vídeo” (SANTOS, 2020). Ainda STURMER (2011) reforça que a mediação de recursos educacionais digitais devem ser vistos como ferramentas potencializadoras para que o aluno possa assimilar em todas suas possibilidades e dimensões os conteúdos.

É importante lembrar que aspectos epistemológicos e pedagógicos precisam dialogar para um melhor entendimento dos conceitos físicos abordados no EQ. Ademais, uma abordagem conceitual histórica, remetendo a conceitos da FC para compreensão de conceitos da MQ, está consonante com a interpretação da Complementaridade Niels Bohr, escolhida pelos autores desse trabalho devido sua maior aceitação na comunidade científica. Note-se que esta evolução conceitual, marcada por rupturas e continuidades, favorece uma abordagem mais interdisciplinar quanto ao entendimento do professor sobre o processo humano (histórico) na construção do conceito científico e a possibilidade de aprofundamento de conhecimentos mais atuais.

A importância do seu estudo [emaranhamento quântico] recai não apenas nas suas aplicações tecnológicas, mas sobretudo nas possibilidades que oferece para compreensão do desenvolvimento da teoria quântica, seja em relação aos seus fundamentos ou aos pressupostos filosóficos e epistemológicos e suas implicações. Esses são aspectos fundamentais quando se defende um ensino de Física que proporcione uma imagem de ciência como processo em construção por seres humanos e com um caráter altamente interdisciplinar. (MOZENA e OSTERMANN, 2016)

Em tempo, destacamos a organização dos capítulos deste trabalho para uma melhor leitura. Iniciamos a escrita (capítulo 1) com definição, exemplos, aplicações de conceitos físicos correlatos que possibilitarão um melhor entendimento do fenômeno físico do emaranhamento quântico, passeando pela FC até chegar na MQ. Já no capítulo 2, está previsto um detalhamento sobre o referencial teórico- metodológico Lev Vygotsky, especificando os conceitos - chaves utilizados para fundamentar o trabalho. No capítulo 3, um breve relato sobre o ensino de emaranhamento. Em seguida, no capítulo 4, será apresentado uma proposta de sequência didática sobre o conceito de emaranhamento quântico proposto pelos autores desse trabalho, bem como um relato de experiência da aplicação.

2 FUNDAMENTAÇÃO DOS CONCEITOS FÍSICOS

Nesta seção serão apresentadas definições, exemplos e aplicações dos conceitos físicos necessários para o entendimento do fenômeno do emaranhamento quântico, partindo das ideias centrais da MC, notadamente estado clássico, comportamento corpuscular (evidenciando o determinismo implícito na teoria) e o quadro teórico ondulatório. Convém dizer que a estruturação deste capítulo foi baseada num viés epistemológico da Complementaridade, proposto por Niels Bohr, o qual defende a necessidade do conhecimento de elementos centrais da MC para comunicar os resultados experimentais no contexto da MQ.

2.1 BASES DA FÍSICA CLÁSSICA

Inicialmente, vamos fazer uma breve introdução sobre o contexto de surgimento da revolução científica do séc. XX, fazendo uma descrição histórica e filosófica das teorias físicas dos séculos anteriores, mais especificamente da teoria clássica, evidenciando os aspectos principais que a caracteriza.

A Física clássica compreende as teorias físicas que surgiram e foram aprofundadas no período histórico do século. XVII até XIX, sendo possível destacar a teoria do movimento newtoniana (núcleo fundamental da Física Clássica), Eletromagnetismo, óptica e Termodinâmica macroscópica.

A partir do séx. XVII, a mecânica newtoniana ocupou um local de destaque dentro da comunidade científica da época, seja pelo grande prestígio associado a Isaac Newton, bem como pelos grandes êxitos da teoria no contexto celeste e terrestre. A física proposta por Newton guardava características marcantes do determinismo, o qual estabelece relação de causa e efeito para sistemas mecânicos. Dessa forma, sendo possível conhecer os estados futuros, presente e passados, uma vez conhecida as condições iniciais e forças aplicadas no sistema. Inclusive, FREIRE JR E CARVALHO NETO (1997) reforçam que houve na época uma projeção de utilização da mecânica newtoniana para todos fenômenos naturais (psíquicos e sociais, por exemplo), revelando uma dimensão filosófica fatalista.

Devemos ter uma grande atenção com duas ideias que estão implícitas no determinismo:

A descrição exata do movimento de um corpo (em termos de posição e velocidade) é possível desde que conheçamos as condições iniciais do movimento (posição e velocidades iniciais), as forças em todos os instantes e a massa do corpo em estudo; A posição e a velocidade estão, simultaneamente, definidas, mesmo que os valores correspondentes a essas duas grandezas não sejam conhecidos. (FREIRE JR E CARVALHO NETO, 1997, p.21)

Note-se que ao descrever exatamente o movimento de um corpo, torna-se possível mostrar a trajetória contínua percorrida pela partícula. Santos (2020), corrobora ao afirmar que “a Mecânica Newtoniana, constitui-se, na sua essência, como a Física das partículas materiais”.

2.2 DIFRAÇÃO, INTERFERÊNCIA E O EXPERIMENTO DE DUPLA FENDA

Nessa subseção serão abordados os principais conceitos e fenômenos clássicos, mais especificamente difração, interferência e o experimento de dupla fenda buscando fundamentar

a estratégia didática adotada que assume a linguagem clássica precisa ser compreendida para comunicar resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido, evidentemente, consonante com os pressupostos epistemológicos da interpretação da complementaridade.

MAIA NETO et al (2010) afirmam que a teoria Newtoniana a respeito da natureza da luz está intimamente ligada ao conceito de corpúsculos. PESSOA JR (2020), por sua vez, descreve-os da seguinte forma:

(...) são fáceis de representar mentalmente: são redondinhas, seguem caminhos bem definidos, e mantêm sua identidade, sem se desmanchar. Duas propriedades podem ser destacadas: elas são indivisíveis (até uma certa energia de destruição) e são bem localizadas (ou seja, cada uma está num ponto bem definido). (p.3)

Contudo, um outro quadro teórico bastante relevante no contexto da Física clássica e conveniente para análise que faremos nas seções seguintes é o modelo ondulatório. Este quadro passou por significativas mudanças no decorrer da História da Física, desde sua primeira formulação vibracional/ondulatório, elaborado por Huygens, até chegar na forma mais consolidada e bem aceita pela comunidade científica, com as contribuições de Thomas Young e Augustin Fresnel, explicando o fenômeno da difração e interferência. Vale salientar que quando James Clarck Maxwell constatou que a luz é uma onda eletromagnética, já era estabelecido um modelo ondulatório bastante sólido e, mais adiante, “suas previsões foram verificadas nos experimentos realizados por Heinrich Rudolf Hertz, em 1888” (MAIA NETO et al, 2010).

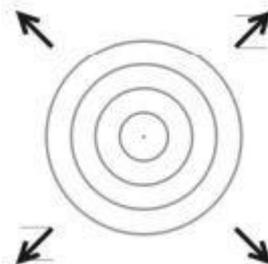
A compreensão do modelo ondulatório é bastante acessível quando contextualizado com uma situação real do cotidiano, possível de ser reproduzida. Nesse sentido,

A melhor maneira de entender as ondas é olhando para elas. Em cima de um rochedo em uma praia de surfista, vemos as ondas vindo de maneira regular, antes de quebrarem na areia. Como um surfista sente as ondas? Suponha que ele esteja atrás da arrebentação, no entardecer, olhando para as primeiras estrelas do céu, deitado em cima de sua prancha. Ele sentirá as ondas através de um movimento de sobe e desce. Isso é curioso: temos a impressão de que uma onda anda para frente, mas os objetos flutuando na água – e as próprias moléculas da água – não andam para frente (a não ser na arrebentação), mas apenas sobem e descem! Pode-se dizer que há transporte horizontal de energia, mas não de matéria. (PESSOA JR, 2020, p.4)

Agora, faremos uma análise de uma onda plana circular que pode ser obtida, por exemplo, ao soltar uma pedra na direção vertical, no sentido de cima para baixo, num lago. Certamente, será visualizado ondas circulares se propagando para fora do ponto onde caiu a

pedra. A representação da superfície do lago é ilustrada na figura 1. Note-se que cada circunferência corresponde a um ponto de máximo, sendo justificado pelo conceito de interferência de ondas.

Figura 1 - Imagem Ilustrativa de Ondas Circulares Planas

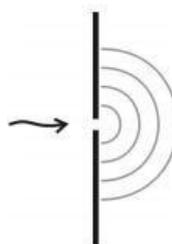


Fonte: PESSOA JR. (2020)

Segundo NUSSENVEIG (2014), o conceito de difração está relacionado a deflexão de raios luminosos, podendo aplicar-se a passagem de ondas por aberturas e o espalhamento por um obstáculo. Além disso, os fenômenos ondulatórios da difração e interferência de ondas estão associados entre si.

Se considerarmos que uma frente de onda encontra um anteparo com um pequeno orifício, como mostrado na figura 2, podemos perceber que o orifício pode ser compreendido como uma fonte de onda, uma vez que a frente de onda sofre difração, originando ondas circulares ao passar pelo orifício.

Figura 2- Imagem Ilustrativa da Difração numa Fenda Única

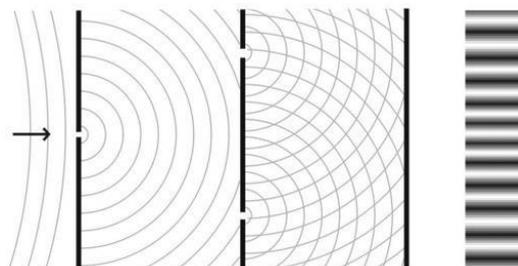


Fonte: PESSOA JR. (2020)

De forma análoga, se tivermos dois orifícios, teremos duas fontes de ondas circulares que serão superpostas entre si, caracterizando interferência de ondas construtivas, quando coincidem os máximos ou mínimos das ondas, e interferência destrutiva, quando coincidem o máximo de uma onda com o mínimo da outra. Convém lembrar que a configuração citada é

percebida no experimento histórico de dupla fenda atribuído a Thomas Young, como ilustrado na figura 4.

Figura 3- Imagem Ilustrativa da difração com fendas única e dupla e interferência

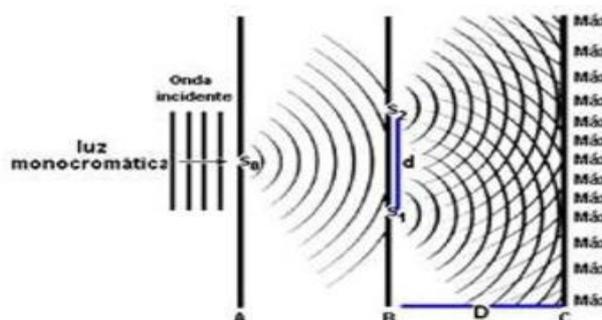


Fonte: PESSOA JR. (2020)

Entre 1801 e 1803, Thomas Young realizou os primeiros experimentos que mostravam, de maneira convincente, que a luz devia ser um fenômeno ondulatório. Ele mostrou que, sob certas condições, dois feixes de luz podem interferir. Em outras palavras, a intensidade resultante da combinação de dois feixes não é igual à soma de suas intensidades individuais, pois ela pode ser maior que a soma das mesmas ou até nula. Essa, no entanto, é uma propriedade característica da superposição de ondas já conhecida na época por meio da observação de vários fenômenos ondulatórios. Thomas Young demonstrava, assim, uma propriedade da luz que era incompatível com a teoria corpuscular da mesma (MAIA NETO et al, 2010)

No caso do experimento de Young, é utilizada uma fonte luminosa monocromática coerente, ao passar pelas fendas (orifícios), a luz sofre difração, projetando franjas claras e escuras no anteparo que são justificadas pelo modelo ondulatório, no regime clássico, ao tratar da interferência. Ficando evidente que se refere a um fenômeno tipicamente ondulatório e “contrário das partículas, elas [as ondas] são divisíveis o quanto se queira, e são espalhadas no espaço. Além disso, uma onda pode cancelar outra”(PESSOA JR, 2020).

Figura 4- Imagem Ilustrativa do experimento de dupla fenda realizado por Young



Fonte: Disponível em: <http://fisicaevestibular.com.br/ondas5.htm>. Acesso em: 15 Mar. 2023

Para tanto, a natureza da luz desde a antiguidade tem sido o centro dos debates no âmbito da comunidade científica, inclusive, tendo seu ápice no séc. XVII com as figuras de Isaac Newton e Huygens, defendendo modelos corpusculares e ondulatórios, respectivamente. Diante desse contexto, podemos enfatizar que através das contribuições de Young, Maxwell e Fresnel foi possível estabelecer ao final do séc. XIX um modelo consolidado e mais bem aceito para luz. Apesar disso, MAIA NETO et al (2010) reforçam que no início do séc. XX com advento da MQ, retornou a discussão que parecia resolvida, pois em algumas situações experimentais a luz se comporta como partículas de energia mínima discreta e indivisível e em outras, como onda, exibindo franjas de interferência.

2.3 POLARIZAÇÃO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA TRATAMENTO CLÁSSICO

Neste trabalho, utilizaremos o fenômeno físico da polarização da luz para realizar a transição da FC para adentrar nos fenômenos quânticos.

NUSSENZVEIG (1994) explica que a polarização da luz pode ocorrer através de filtros polaróides constituídas de moléculas longas e finas, todas orientadas na mesma direção. Dessa forma, estabelecendo uma direção para estes filtros especiais. Doravante, utilizaremos o termo filtro polarizador referindo-se ao filtro constituído por polaróides.

Relembremos que a luz no regime clássico trata-se de uma onda eletromagnética. Por onda eletromagnética entende-se ondas transversais associados aos campos elétrico (\vec{E}) e

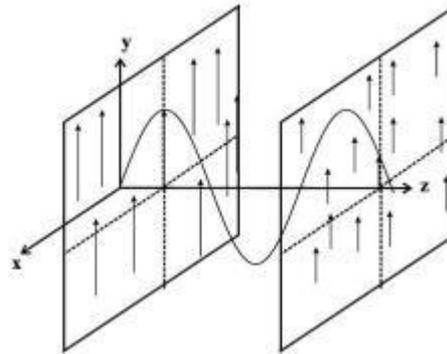
magnético (\vec{B}) mutuamente ortogonais e ortogonais a direção de propagação da mesma.

os campos \vec{E} e \vec{B} são vetores e podem apontar, a cada instante, ao longo de qualquer

direção contida nesse plano. Por esse motivo, para que uma onda eletromagnética seja completamente determinada, precisamos descrever, a cada instante, não só o módulo, mas também a direção desses vetores nos planos ortogonais à direção de propagação da onda. Essa descrição está intimamente relacionada ao conceito de polarização da onda eletromagnética. (MAIA NETO et al, 2020)

Sabendo que os vetores campos elétrico e magnético estão intimamente ligados numa onda eletromagnética, isto é, através da descrição de um dos campos podemos descrever a onda eletromagnética. Convenientemente, há uma predileção por razões técnicas para utilização do campo elétrico para análise da onda eletromagnética, inclusive, para tratarmos o fenômeno da polarização da luz.

Figura 5 - Representação esquemática de uma onda plana propagando-se ao longo do eixo z. Os dois planos representam frentes de onda. Em cada um deles, as setas representam o vetor campo elétrico.



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

Vale ressaltar que os tamanhos das setas que representam a amplitude do campo variam de um plano a outro, sendo perceptível que a direção e o sentido permanecem constantes. Contudo, no mesmo plano a intensidade, o sentido e a direção permanecem inalteradas. Note-se que a figura 5 representa um esquema de uma onda plana, propagando-se ao longo do eixo z, uma vez que as duas frentes de onda são planos ortogonais ao eixo z e, obviamente, não possui componente do vetor campo elétrico nesta direção.

Cada posição z e para cada instante de tempo t, o campo elétrico da onda é completamente determinado por suas componentes $E_x(z, t)$ e $E_y(z, t)$, ao longo dos eixos x e y, respectivamente. Em particular, o ângulo θ entre o vetor campo elétrico

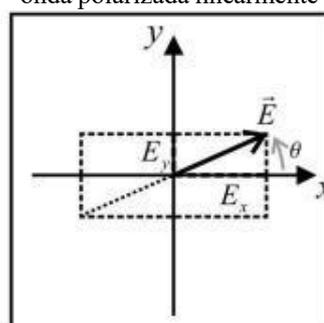
\vec{E} e o eixo x é tal que $\tan(\theta) = E_y(z,t) / E_x(z,t)$. À medida que a onda se propaga, o

valor de cada uma dessas componentes, numa dada posição z, varia no tempo. Com

isso, a direção do vetor campo elétrico \vec{E} , na posição z, que pode ser medida através

do ângulo θ , também pode variar no tempo. (MAIA NETO et al, 2010)

Figura 6 - Representação esquemática do comportamento temporal do vetor campo elétrico em uma onda polarizada linearmente



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

Ao tratarmos a polarização da luz, precisamos determinar o comportamento do vetor campo elétrico num determinado instante de tempo em qualquer plano ortogonal à direção de propagação da onda eletromagnética. Se considerarmos que o módulo e o sentido do vetor

campo elétrico mudam no tempo, permanecendo sua direção constante dizemos que a onda é linearmente polarizada e sua direção de polarização é dada, nesse caso, pelo ângulo θ entre o vetor campo elétrico e o eixo x.

A expressão para o campo elétrico de uma onda plana monocromática permitirá a identificação do tipo de polarização da onda, sendo elas: linear, circular e elíptica. Vale salientar que, neste trabalho, focaremos na polarização linear e tomaremos com base o caderno de física do CEDERJ 2010 (MAIA NETO et al, 2010).

Utilizaremos a notação complexa, mais especificamente a notação de Euler, para escrita da expressão do campo elétrico, uma vez que possibilita uma maior facilidade no tratamento de cálculos longos envolvendo funções periódicas do tipo seno e cosseno, geralmente, utilizadas para descrever ondas harmônicas.

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_0)}, \quad (1)$$

em que \vec{E}_0 é um vetor real e $E(\vec{r}, t)$ uma grandeza complexa necessário para

otimização dos cálculos.

Convém dizer que como $E(\vec{r}, t)$ é uma grandeza complexa, sendo assim não podem

ser diretamente identificadas como grandezas físicas mensuráveis, diferentemente do campo elétrico. Neste caso, o significado físico da expressão está associado a parte real das expressões resultantes. Logo, o campo elétrico deve ser necessariamente real.

Se tomarmos a parte real da expressão 1, podemos determinar o campo elétrico representado na forma complexa:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re } E(\vec{r}, t) = \text{Re } \left[\vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_0)} \right] \quad (2)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re } E(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_0) \quad (3)$$

Retornando a onda plana monocromática, propagando-se ao longo do eixo z . A representação complexa do campo elétrico de uma tal onda pode escrita como:

$$\vec{E}^+(z,t) = \vec{E}^0 e^{-i(kz - \omega t)}, \quad (4)$$

Em que \vec{E}^0 é um vetor complexo, sem componente ao longo do eixo z . Note-se que com a

representação explicitada na equação 4 não é possível, a priori, dizer qual é o tipo de polarização da

onda plana, uma vez que não estão evidenciadas as componentes do vetor campo elétrico ao

longo do eixo x e do eixo y . Dessa forma, para melhor descrever as componentes afim de possibilitar a identificação do estado de polarização, deve-se especificar:

$$\vec{E}^+(x,y,z,t) = [E_x(z) \hat{x} + E_y(z) \hat{y}] e^{-i(kz - \omega t)}, \quad (5)$$

Escrevendo $E_x(z) = E_{ox} \cdot e^{i(kz + \varphi_x)}$ e $E_y(z) = E_{oy} \cdot e^{i(kz + \varphi_y)}$ e sabendo que E_{ox} e E_{oy}

são constantes reais, podemos reescrever a equação 5 da seguinte forma:

$$\vec{E}^{\rightarrow+}(x, y, z, t) = [E_{ox} \cdot e^{i\varphi_x} \hat{x} + E_{oy} \cdot e^{i\varphi_y} \hat{y}] \cdot e^{i(kz - \omega t)}, \quad (6)$$

Simplificando:

$$\vec{E}^{\rightarrow+}(x, y, z, t) = [E_{ox} \cdot e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)} \hat{x} + E_{oy} \cdot e^{i(kz - \omega t + \varphi_y)} \hat{y}], \quad (7)$$

Colocando o termo $e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)}$ em evidência, temos:

$$\vec{E}^{\rightarrow+}(x, y, z, t) = [E_{ox} \hat{x} + E_{oy} \cdot e^{i(\varphi_y - \varphi_x)} \hat{y}] \cdot e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)}, \quad (8)$$

Doravante, adotaremos $\delta = \varphi_y - \varphi_x$, a diferença de fase entre as componentes E_y e E_x do campo elétrico. Vale ressaltar que a diferença de fase entre as componentes do campo elétrico possui bastante relevância na determinação do estado de polarização de uma onda eletromagnética que se propague ao longo do eixo z . Logo, a equação 8 fica:

$$\vec{E}^{\rightarrow+}(x, y, z, t) = [E_{ox} \hat{x} + E_{oy} \cdot e^{i\delta} \hat{y}] \cdot e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)}, \quad (9)$$

Perceba que o significado físico do vetor campo elétrico se dá na parte real do campo complexo da equação (9), isto é:

$$\vec{E}^{\rightarrow}(x, y, z, t) = \text{Re} \vec{E}^{\rightarrow+}(x, y, z, t) = \text{Re} [E_{ox} \hat{x} + E_{oy} \cdot e^{i\delta} \hat{y}] \cdot e^{i(kz - \omega t + \varphi_x)} \quad (10)$$

Adote φ_x igual a zero, uma vez considerado a origem de tempo. Sendo assim:

$$\vec{E} \rightarrow (x, y, z, t) = \text{Re } \vec{E} \rightarrow + (x, y, z, t) = \text{Re} \left[E_{0x} \hat{x} + E_{0y} \cdot e^{i\delta} \hat{y} \right] e^{i(kz - \omega t)} \quad (11)$$

Multiplicando o termo exponencial pelos termos entre colchetes, temos:

$$\vec{E} \rightarrow (x, y, z, t) = \text{Re } \vec{E} \rightarrow + (x, y, z, t) = \text{Re} \left[E_{0x} \cdot e^{i(kz - \omega t)} \hat{x} + E_{0y} \cdot e^{i(kz - \omega t + \delta)} \hat{y} \right] \quad (12)$$

Logo,

$$\vec{E} \rightarrow (x, y, z, t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \hat{x} + E_{0y} \cos(kz - \omega t + \delta) \hat{y} \quad (13)$$

Note-se que a equação 13 fornece a informação que o vetor campo elétrico possui componentes ao longo dos eixos x e y, que variam da mesma maneira com a fase $\varphi = kz - \omega t$

(em que k é o número de onda e ω é a frequência angular da onda monocromática). Convém

dizer que existem duas diferenças entre essas componentes, na qual a primeira é a diferença de fase (δ) entre elas, já a segunda, está nas amplitudes E_{0x} e E_{0y} de cada componente.

Matematicamente, podemos demonstrar que o campo elétrico descrito na equação 13 representa uma onda linearmente polarizada, uma vez que $\delta = 2n\pi$ ou $\delta = (2n + 1)\pi$

Tomando a situação em que $\delta = 2n\pi$, com $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Nesse caso, para $n=0$, tem $\cos(\theta + 2n\pi) = \cos(\theta)$. Dessa forma, podemos escrever

$$\vec{E} \rightarrow (x, y, z, t) = (E_{0x} \hat{x} + E_{0y} \hat{y}) \cos(kz - \omega t) \quad (14)$$

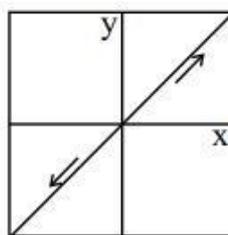
$$\vec{E} \rightarrow (x, y, z, t) = \vec{E}_0 \rightarrow \cdot \cos(kz - \omega t) \quad (15)$$

$\vec{E}_0 \rightarrow$ é um vetor constante. Note-se que o campo elétrico é dado por um vetor constante,

multiplicado por uma função escalar, periódica, de z e t . Em outras palavras, a direção do vetor campo elétrico é constante e seu módulo e o sentido variam periodicamente. Logo, podemos concluir que quando $\delta = 2n\pi$, o campo elétrico representa uma onda linearmente polarizada.

Vale ressaltar que, neste caso, a direção θ da polarização da onda é dada por $\theta = \tan^{-1}(E_{0y}/E_{0x})$. Como E_{0x} e E_{0y} são constantes positivas, o campo elétrico oscila ao longo de uma linha localizada nos quadrantes 1 e 3. O caso especial em que $E_{0x} = E_{0y}$, ou seja, as amplitudes das componentes E_x e E_y do campo elétrico são iguais, é mostrado na Figura 7, isto é, a direção de polarização é $\theta = 45^\circ$.

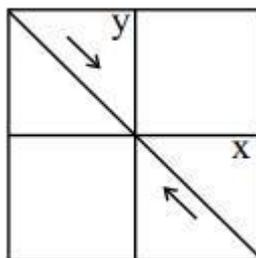
Figura 7 - Representação esquemática do comportamento temporal do vetor campo elétrico em uma onda polarizada linearmente



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

De forma análoga, para $\delta = (2n + 1)\pi$, com $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, temos $\cos[\theta + (2n + 1)\pi] = -\cos(\theta)$. Logo, a direção de polarização é dada por $\theta = \tan^{-1}(-E_{0y}/E_{0x})$. Nessa situação, o campo elétrico oscila ao longo de uma linha localizada nos quadrantes 2 e 4. Além disso, o caso que $E_{0x} = E_{0y}$ a direção de polarização é $\theta = 135^\circ$, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática do comportamento temporal do vetor campo elétrico em uma onda polarizada linearmente com $\delta = (2n + 1)\pi$ e $\theta = 135^\circ$



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

Se tomarmos uma dada posição z , o módulo do campo elétrico é constante no tempo, mas sua direção varia periodicamente. Nesse caso, a extremidade do vetor campo elétrico

descreve um círculo no plano xy . Dizemos, então, que a onda é circularmente polarizada. O sentido de rotação do vetor campo elétrico pode ser tanto anti-horário quanto horário. Note-se que a equação 13 que descreve o campo elétrico físico pode ser reescrito para situação em que $E_{ox} = E_{oy} = E_o$ e $\delta = \pi/2 + 2n\pi$, com $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Nesse caso, como $\cos(\theta + \pi/2 + 2n\pi) = -\sin(\theta)$, teremos

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_o [\cos(kz - \omega t) \hat{x} - \sin(kz - \omega t) \hat{y}] \quad (16)$$

O módulo do vetor campo elétrico pode ser escrito:

$$E = \sqrt{\quad} = E_o \quad (17)$$

Logo, nesse caso, o módulo do vetor campo elétrico será constante, variando apenas sua direção. Sendo assim, assumindo a equação 17 e, sem perda de generalidade, o plano $z=0$, a direção θ do vetor campo elétrico, em relação ao eixo x , é dada por $\tan(\theta) = E_y/E_x$. Dessa forma:

$$\tan(\theta) = E_y/E_x = -E_o \sin(-\omega t) / E_o \cos(\omega t) \quad (18)$$

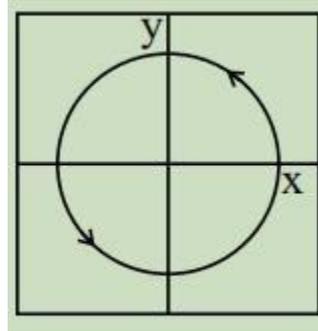
$$\tan(\theta) = \tan(\omega t) \quad (19)$$

Logo, resolvendo para θ , podemos obter o comportamento temporal da direção do vetor campo elétrico, em relação ao eixo x :

$$\theta(t) = \omega t + n\pi \quad (20)$$

A equação 20 fornece a informação da variação linear do ângulo θ com a velocidade angular constante ω . Dessa forma, temos o vetor campo elétrico girando no sentido anti-horário, com velocidade angular ω , mantendo seu módulo constante. Portanto, trata-se de uma onda circularmente polarizada à esquerda, como representado na figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática do comportamento temporal do vetor campo elétrico em uma onda polarizada circularmente à esquerda com $\delta = \pi/2$



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

De forma análoga ao caso anterior, para $E_{ox} = E_{oy} = E_0$ e $\delta = (3\pi/2) + 2n\pi$, com $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Nesse caso, como $\cos(\theta + 3\pi/2 + 2n\pi) = \sin(\theta)$, a equação 13 reescrita fica:

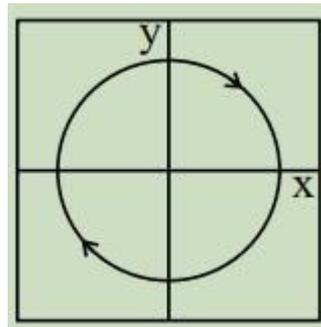
$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 [\cos(kz - \omega t) \hat{x} + \sin(kz - \omega t) \hat{y}] \quad (21)$$

Obviamente, o comportamento temporal da direção do vetor campo elétrico, em relação ao eixo x, será:

$$\theta(t) = -\omega t + n\pi. \quad (22)$$

Implicando no ângulo θ diminuindo continuamente com a velocidade angular. Em outras palavras, o vetor campo elétrico girará no sentido horário, com velocidade angular ω e mantendo seu módulo constante, caracterizando uma onda circularmente polarizada à direita.

Figura 10 - Representação esquemática do comportamento temporal do vetor campo elétrico em uma onda polarizada circularmente à direita com $\delta = 3\pi/2$



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

Para valores de δ , E_{ox} e E_{oy} diferentes dos discutidos até agora, temos uma onda elipticamente polarizada.

A Equação 13 descreve o campo elétrico de uma onda de polarização arbitrária em sua representação real, podemos dizer que aquele campo é a soma de dois campos. Um campo E_x , de uma onda linearmente polarizada na direção x, e outro campo E_y de uma onda linearmente polarizada na direção y. Isso significa que a superposição de duas ondas planas monocromáticas de mesma frequência e com polarizações lineares em direções ortogonais pode dar origem a uma onda com qualquer polarização. Em outras palavras, dois estados de polarização linear ortogonais entre si formam uma base para os estados de polarização da luz,

notadamente, a combinação dos vetores unitários \hat{y} e \hat{z} gera um outro vetor de polarização (não necessariamente linear).

Por fim, podemos generalizar a polarização para uma direção arbitrária \hat{k} . Dado o caráter transversal das ondas eletromagnéticas, o vetor campo elétrico, a cada instante, tem,

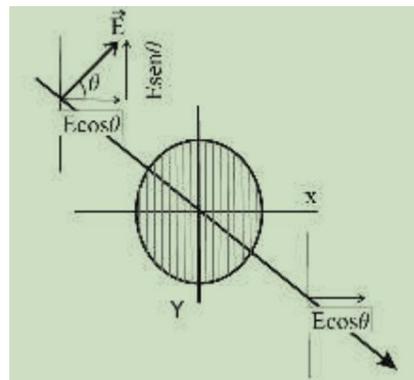
necessariamente, de estar em um plano ortogonal ao vetor \hat{k} . Se, nesse plano, escolhermos

, qualquer
duas direções ortogonais entre si e representadas pelos vetores unitários $\hat{\epsilon}_1$ e $\hat{\epsilon}_2$
onda plana monocromática de polarização arbitrária poderá ser representada como uma
superposição de duas ondas, linearmente polarizadas nas direções $\hat{\epsilon}_1$ e $\hat{\epsilon}_2$.

2.4 FILTROS POLARIZADORES - TRATAMENTO CLÁSSICO

Agora, vamos observar situações experimentais envolvendo a polarização linear, a partir da interação da onda eletromagnética com o filtro polarizador. NUSSENZVEIG (1994) explica que a polarização da luz pode ocorrer através de filtros polaróides constituídas de moléculas longas e finas, todas orientadas na mesma direção. Dessa forma, estabelecendo uma direção para estes filtros especiais. Tecnicamente, existe uma diferença entre os filtros polaróides e polarizadores referente a absorção ou reflexão da luz, contudo, doravante, utilizaremos o termo filtro polarizador referindo-se ao filtro constituído por polaróides e/ou qualquer objeto que transmita apenas a componente do campo elétrico incidente, paralela a uma dada direção.

Figura 11 - Representação de uma onda plana polarizada linearmente, incidindo sobre um polarizador que absorve as componentes do campo elétrico orientadas ao longo da direção vertical



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

Nesta figura está representado o campo elétrico de uma onda luminosa, polarizada linearmente ao longo da direção que forma um ângulo θ com o eixo do polarizador. A onda incide, em um ângulo normal, sobre o mesmo e parte do campo elétrico da onda será

absorvida e parte, transmitida. Se tomarmos a equação (14) e reescrevermos as componentes do vetor campo elétrico em função do ângulo θ , podemos escrever a fração da intensidade incidente que será transmitida:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = (E_0 \cos\theta \hat{x} + E_0 \sin\theta \hat{y}) \cos(kz - \omega t) \quad (23)$$

Recordemos que a intensidade é definida como o módulo do vetor de Poynting e representa o fluxo de energia por unidade de tempo e de área, considerando vários períodos de oscilação da onda. Logo, para uma onda plana monocromática, a intensidade será dada por:

$$I_0 = \frac{1}{\mu v} E_0^2 = \frac{1}{\mu} \epsilon E_0^2 \quad (24)$$

Em que ϵ é a constante dielétrica do meio onde a onda se propaga e v sua velocidade

nesse meio. Vale ressaltar que através desta equação, podemos ver que a intensidade é proporcional ao quadrado do módulo da amplitude do campo elétrico.

Logo, se escrevermos o vetor campo elétrico transmitido ilustrado na figura 11, temos

$$\vec{E} = (E_0 \cos \theta) \cos(kz - \omega t) \hat{x} \quad (25)$$

Reescrevendo a equação 25 com a componente do vetor campo elétrico transmitida, temos

$$I = \frac{1}{\mu} \epsilon (E_0 \cos \theta)^2 \quad (26)$$

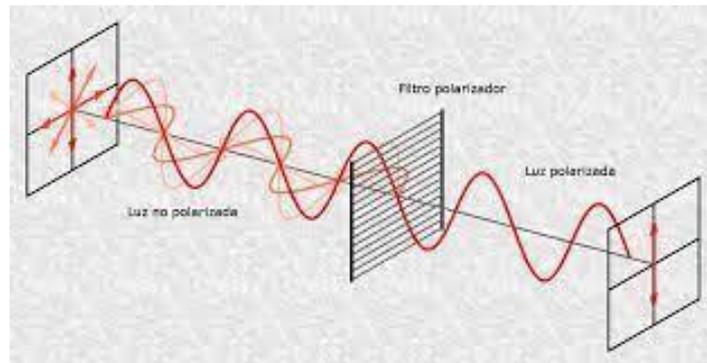
Dessa forma, se reorganizarmos as equações 24 e 26, temos:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (27)$$

Portanto, obtemos a relação entre a intensidade da luz transmitida e a intensidade da luz incidente, conhecida como Lei de Malus. Vale ressaltar que independente da polarização da luz incidente, a fração da onda luminosa que atravessa o polarizador será linearmente polarizada na direção em que o campo elétrico não é absorvido, ou seja, na direção do eixo do polarizador.

Ao incidir um feixe de luz sobre um filtro polarizador, podemos observar que o filtro interage com a radiação, fazendo-a assumir uma característica peculiar, na qual, apenas, a componente do vetor campo elétrico orientada na direção do polarizador é transmitida, sendo retida a radiação que não coincida com a direção do mesmo.

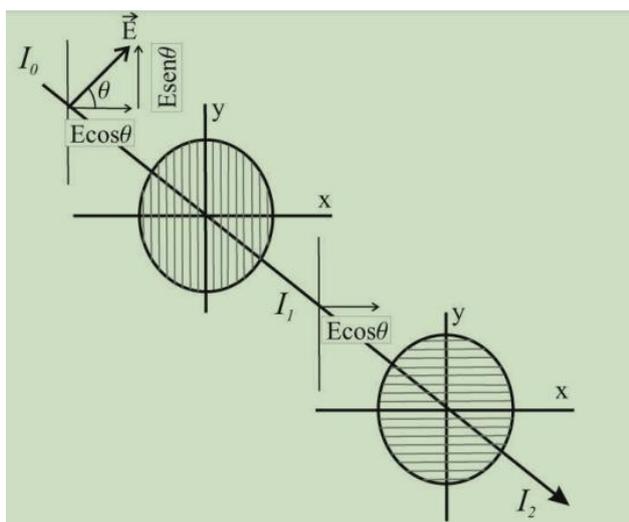
Figura 12 - Imagem Ilustrativa da Polarização Linear da luz no regime clássico



Fonte: disponível <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:LuzPolarizada.jpg>

Agora, se considerarmos um feixe de luz passando por dois polarizadores configurados de forma que o ângulo entre eles seja de 90° , ou seja perpendiculares entre si, pode-se observar que não é possível enxergar nada através dos filtros, pois, só passa pelo primeiro filtro a radiação que coincide com a direção deste filtro. Logo, esta parcela da radiação não passará pelo segundo filtro que é perpendicular à direção do segundo polarizador. Note-se que nesta situação, o ângulo entre os filtros polarizadores influencia na visualização ou não através dos mesmos. Por outro lado, se o ângulo entre ambos for de 0° , a radiação passará, com menor intensidade em relação ao feixe original, pois não terá absorção. Já no caso do ângulo entre eles de 45° , apenas a componente do vetor campo elétrico orientada na direção do polarizador será transmitida e a componente ortogonal será absorvida.

Figura 13 - Imagem Ilustrativa de uma luz linearmente polarizada incidindo sobre um conjunto de dois filtros polarizadores cujos eixos são ortogonais entre si.



Fonte: MAIA NETO et al (2010)

2.5 POSTULADOS E BASES DA MQ

Nesta subseção serão apresentados três postulados e bases da MQ, tais postulados são baseados na proposta original de John Von Neumann, publicados em 1932. O intuito de apresentar estas ideias centrais é possibilitar a transição entre MC e a MQ, sendo assim um melhor entendimento e caracterização da polarização de fótons. Além disso, será evidenciado a notação utilizada no contexto da teoria quântica. Inicialmente, vamos trazer um conceito fundamental para nosso entendimento dos postulados e bases da MQ, trata-se do vetor de

estado. PEREZ (1984) afirma que a teoria quântica é um formalismo matemático que permite aos cientistas calcular probabilidades para a ocorrência de eventos. Este formalismo, por sua vez, envolve o uso do complexo espaço de Hilbert, cujos vetores são chamados de "estados". Se tomarmos o exemplo de uma partícula não-relativística, o vetor de estado é, convenientemente, representado por uma função de onda (ψ) (função do tempo e das coordenadas espaciais ordinárias) desde que satisfaça a equação de Schrodinger. Para apresentação dos postulados, utilizaremos como referência o texto do livro do Cohen-Tannoudji (1977, p. 213 a 221):

Postulado 1 - Descrição do estado de um estado físico

Em um instante de tempo t_0 , o estado de um sistema físico é definido especificando-se

um ket $|\psi(t_0)\rangle$ que pertence ao espaço de estado (ϵ) do sistema.

Note-se que como ϵ é um espaço vetorial, ele admite o princípio de superposição, ou seja, a combinação linear de vetores de estado é um vetor de estado.

SANTOS (2020) estende a análise do conceito de vetor de estado para FC e define a posição e momento como vetores de estado no contexto desta teoria, uma vez que o objeto clássico apresenta características específicas, sendo elas: posição e velocidade bem definidas, implicando numa trajetória conhecida.

Postulado 2 - Descrição das Quantidades Físicas

Toda quantidade física mensurável A é descrita por um operador \hat{A} atuando em ϵ ; este

operador é um observável.

Postulado 3 - Medida das Quantidades Físicas

O único resultado possível em uma medida de uma quantidade física A é um dos

autovalores do observável correspondente \hat{A} .

Vale lembrar da equação de autovalores para o observável \hat{A} (no caso discreto, que

implica na quantização dos resultados da medida): $\hat{A}|u^i\rangle = a_n|u^i\rangle$; $i = 1, \dots, g_n$

Onde: $\langle u_n^i | u_n^{i'} \rangle = \delta_{nn} \cdot \delta_{ii}$;

Postulado 4 - Caso de um Espectro Discreto Não-Degenerado

Quando a quantidade física A é medida em um sistema no estado normalizado $|\psi\rangle$, a

probabilidade $P(a_n)$ de obter o autovalor não-degenerado a_n do observável correspondente \hat{A} é:

$$P(a_n) = |\langle u_n^i | \psi \rangle|^2, \quad (28)$$

onde $|u_n\rangle$ é o autovetor normalizado de A associado ao autovalor a_n . Em outras

palavras, o quarto postulado estabelece a probabilidade de obter como resultado o autovalor não degenerado sendo a grandeza física medida num sistema no estado normalizado.

Postulado 5 - Redução do Pacote de Ondas

Se a medida da quantidade física A em um sistema físico no estado $|\psi\rangle$, fornece o

resultado a_n , o estado do sistema imediatamente após a medida é a projeção normalizada de

$|\psi\rangle$, no autovetor $|u_n\rangle$, associado ao autovalor a_n .

Em outras palavras, o quinto postulado prevê que o estado do sistema, imediatamente, após a medição é a projeção normalizada do vetor de estado, no autovetor, uma vez que a

medição da quantidade física é realizada no sistema que se encontra no estado $|\psi\rangle$.

Por último, mas não menos importante, temos que a evolução temporal do vetor de estado é descrita pela equação de Schrodinger.

Postulado 6 - Evolução Temporal de um Sistema Físico

A evolução temporal do vetor de estado $|\psi(t)\rangle$ é governada pela equação de

Schrödinger

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = H(t) |\psi(t)\rangle \quad (29)$$

em que $H(t)$ é o observável associado à energia total do sistema.

2.6 QUANTIZAÇÃO DO CAMPO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Nesta subseção será apresentado a quantização do campo de radiação eletromagnética, partindo da discussão sobre o tratamento clássico desta teoria e utilizando-se dos postulados e bases da teoria quântica, especificados na seção 2.5. Dessa forma, faremos a transição entre a MC para MQ baseando-se em FIGUEIREDO (2008).

Inicialmente, lembremos que o campo eletromagnético clássico em uma região livre de matéria é descrito pelas equações de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{B} = c^{-2} \partial_t \mathbf{E}, \quad (30)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad (31)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (32)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0, \quad (33)$$

Em que c é a velocidade da luz. Usando o calibre de Coulomb $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ os vetores \mathbf{E} e \mathbf{B} são determinados a partir de um potencial vetor \mathbf{A} pelas equações

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (34)$$

$$\mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{A}. \quad (35)$$

Se tomarmos a solução para o potencial vetor juntamente com as relações (34) e (35) encontramos o campo elétrico:

$$\vec{\mathbf{E}} = \frac{1}{2\epsilon_0} \sum_{\mathbf{k}, \lambda} \left(\frac{\hbar}{2\epsilon_0} \right)^{1/2} \left[a_{\mathbf{k}, \lambda} e^{-i(\omega_{\mathbf{k}} t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} - a_{\mathbf{k}, \lambda}^* e^{i(\omega_{\mathbf{k}} t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \right] \quad (36)$$

E o campo magnético:

$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{1}{2\epsilon_0} \sum_{\mathbf{k}, \lambda} \left(\frac{\hbar}{2\epsilon_0} \right)^{1/2} (\mathbf{x}) \left[a_{\mathbf{k}, \lambda} e^{-i(\omega_{\mathbf{k}} t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} + a_{\mathbf{k}, \lambda}^* e^{i(\omega_{\mathbf{k}} t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \right] \quad (37)$$

O hamiltoniano do campo eletromagnético livre é dado por:

$$H = \int \left(\frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2} + \frac{\mathbf{B}^2}{2} \right) \quad (38)$$

Substituindo 36 e 37 em 38, temos:

$$H = \sum_{\mathbf{k}, \lambda} \left[a_{\mathbf{k}, \lambda}^* a_{\mathbf{k}, \lambda} + \frac{1}{2} \right] \quad (39)$$

Vale ressaltar que o nosso sistema físico, notadamente o campo eletromagnético, possui três observáveis clássicas, sendo elas: campo elétrico (\mathbf{E}), campo magnético (\mathbf{B}) e o hamiltoniano do sistema (H). Dessa forma, consonante com os postulados e bases desta teoria (ver seção 2.5) a quantização se realiza associando as observáveis do sistema a operadores hermitianos que atuam no espaço de Hilbert, onde os vetores representam estados acessíveis ao sistema. Operacionalmente, introduziremos os operadores mutuamente adjuntos $a_{\mathbf{k}, \lambda}$ e $a_{\mathbf{k}, \lambda}^\dagger$ associados aos coeficientes $a_{\mathbf{k}, \lambda}$ da série de Fourier que devem satisfazer as relações de comutação

bosônicas:

$$[a_{\mathbf{k},\lambda}, a_{\mathbf{k}',\lambda'}^\dagger] = \delta_{\mathbf{k},\mathbf{k}'} \delta_{\lambda,\lambda'} \quad (40)$$

$$[a_{\mathbf{k},\lambda}, a_{\mathbf{k}',\lambda'}] = [a_{\mathbf{k},\lambda}^\dagger, a_{\mathbf{k}',\lambda'}^\dagger] \quad (41)$$

A partir destas informações, podemos escrever o operador hamiltoniano do campo da seguinte forma:

$$\hat{H} = \sum_{\mathbf{k},\lambda} \left[a_{\mathbf{k},\lambda}^\dagger + a_{\mathbf{k},\lambda} \right]^2 / 2 \quad (42)$$

Dessa forma, o operador campo elétrico pode ser escrito como:

$$\hat{E} = i \sum_{\mathbf{k},\lambda} \left(\frac{\hbar \omega_{\mathbf{k},\lambda}}{V} \right)^{1/2} [a_{\mathbf{k},\lambda} e^{-i(\omega_{\mathbf{k},\lambda} t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} - a_{\mathbf{k},\lambda}^\dagger e^{i(\omega_{\mathbf{k},\lambda} t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}] \quad (43)$$

Note-se que o operador campo elétrico descrito na equação(43) corresponde a uma superposição infinita de osciladores harmônicos. Contudo, no nosso caso, trataremos dos estados de no máximo dois modos. Sendo assim, para um modo individual do campo, o hamiltoniano é dado por:

$$\hat{H} = (\hat{p}^{\dagger} + \hat{p}/2) \quad (44)$$

Perceba que suprimimos os índices k, λ e, quando necessário retornaremos a utilizá-los.

Podemos obter um estado de energia mínima ou estado de vácuo para o campo eletromagnético se aplicarmos sucessivamente o operador a na equação de autovalor com E_n

energia associada ao estado $|n\rangle$:

$$H |n\rangle = E_n |n\rangle \quad (45)$$

Logo,

$$H a|n\rangle = [E_n - \hbar\omega]a|n\rangle \quad (46)$$

$$a|0\rangle = 0 \quad (47)$$

Por outro lado, se aplicarmos o operador a^\dagger na equação 45, obteremos o estado de

maior energia, uma vez que a^\dagger eleva o estado $|n\rangle$:

$$H a^\dagger |n\rangle = [E_n + \hbar\omega] a^\dagger |n\rangle \quad (48)$$

No sistema em análise a energia está diretamente associada ao número de fótons presentes, de forma que os operadores a^\dagger e a podem ser interpretados como operadores de

criação e aniquilação de fótons, respectivamente.

O estado $|n\rangle$ possui o número de quanta de energia presentes no campo de radiação

bem definido e portanto é denominado estado de número ou estado de Fock e o operador \hat{N} é

chamado operador número.

Os estados número formam um conjunto completo, são ortogonais, normalizados e vetores linearmente independentes formando uma base do espaço de Hilbert associado a um modo do campo eletromagnético. Dito isto, um estado arbitrário pode ser escrito por:

$$|\psi\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} |n\rangle \quad (49)$$

Um estado número pode ser obtido do vácuo através de sucessivas aplicações do operador de criação satisfazendo

$$|n\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} \hat{a}^n |0\rangle \quad ; \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (50)$$

É facilmente verificado que o valor esperado do campo elétrico neste estado é nulo,

$$\langle n | \hat{E} | n \rangle = 0 \quad (51)$$

Contudo o valor esperado do operador \hat{E}^2 é:

$$\langle | \quad \rangle \left(\frac{\quad}{k} \right) \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad (52)$$

$$n \hat{E}^2 | n =$$

Esse resultado é fundamental para o entendimento de diversos fenômenos em óptica quântica, tal como emissão espontânea.

2.7 EXPERIMENTO DE DUPLA FENDA - REGIME QUÂNTICO - INTERPRETAÇÃO DA COMPLEMENTARIDADE

Nesta subseção será exposto a interpretação da MQ utilizada pelos autores deste trabalho para análise dos fenômenos físicos, notadamente a interpretação da Complementaridade, partindo da abordagem do experimento de dupla - fenda no regime quântico. Dessa forma, sendo possível distinguir as características dos objetos clássicos e quânticos, especialmente o fóton, objeto de estudo para análise do emaranhamento quântico nas seções posteriores.

Segundo OSTERMANN e PRADO (2005), uma teoria física, como a MQ, prevê um formalismo constituído de formulações axiomáticas e a interpretação afim de buscar descrever da melhor forma a realidade física. Contudo, (PEREZ, 1984) afirma que ao tratar-se de fenômenos microscópicos, o ato da medição para caracterizar um resultado num contexto experimental é bem complexo. Dessa forma, abrindo caminhos para diversas interpretações da MQ, apesar de existir um formalismo mínimo bem aceito pela comunidade científica.

Embora o formalismo possa conter palavras como ‘partícula’ ou ‘estado’, sugerindo significado físico, esses termos não têm outro significado além daquele resultante do lugar que eles ocupam no contexto de F. Assim, F consiste em uma série de fórmulas que são postuladas e de outras fórmulas que são derivadas das primeiras em acordo com regras lógicas. (OSTERMANN e PRADO, 2005 p.3)

As interpretações da MQ surgem pelo fato de não ser aceitável restringir o uso da MQ, exclusivamente, para predição de resultados experimentais. Caso fosse possível, o ensino de tópicos da MQ jamais apresentaria discussões relacionadas as interpretações. Neste trabalho, adotaremos como interpretação base, a Interpretação da Complementaridade, proposta por Niels Bohr, uma vez que é a mais bem aceita e utilizado nos trabalhos científicos atuais.

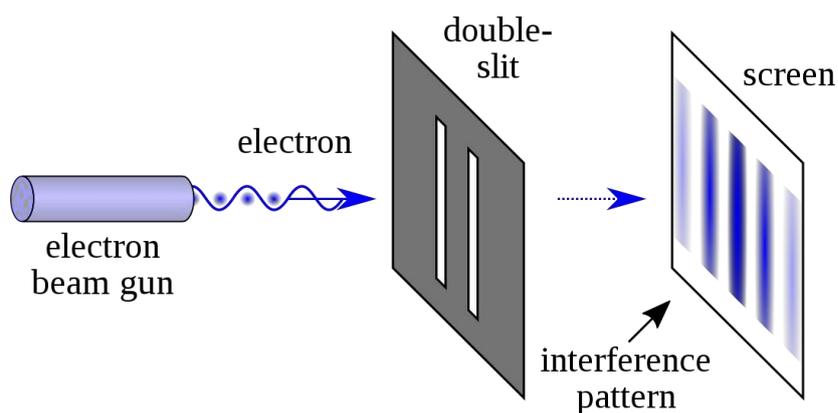
A interpretação da Complementaridade da MQ, defendida pela escola de Copenhagen, estabelece que “os objetos quânticos apresentam um comportamento dual, ora como onda e

outrora como partícula, dependendo das condições do experimento (observado/medido ou não observado/ não medido)” (SANTOS, 2020, p.34) e interpreta que o estado deste objeto antes

da medição é a superposição dos estados possíveis. Além disso, esta interpretação pressupõe que conhecimentos da MC, como ondulatório e corpuscular, são necessários para comunicar os resultados experimentais no contexto da MQ. Em síntese, o que a interpretação de Copenhague defende é que, em certo sentido, “o átomo não medido não é real: seus atributos são criados ou realizados no ato da medição” (ROCHA, 2002, p.354).

Um questionamento que gerou um intenso debate nos séculos passados foi sobre a natureza da luz, se deve ser considerada uma onda ou uma partícula. Contudo, a interpretação adotada neste trabalho não se dispõe a responder este questionamento, mas como se dá o comportamento da luz no regime monofotônico, isto é um fóton emitido por vez, e as implicações dos resultados experimentais obtidos. Para tanto, tomaremos o experimento de dupla - fenda proposto por Young buscando analisar a natureza da luz na escala subatômica.

Figura 14 - Imagem Ilustrativa do Experimento de Fenda Dupla com Elétrons



Fonte: HERRES, 2015

(Disponível em <https://ww.testandmeasurementtips.com/thomas-young-and-the-double-slit-experiment/>)

Para Feynmann (1963), o comportamento dual dos objetos quânticos é visto como uma peculiaridade do regime quântico e entender esse comportamento é fundamental para compreensão da mecânica quântica.

Em suma, embora todos os caminhos da literatura nos encaminham no sentido das paradoxais ‘ondículas’ [objetos que são ondas e partículas], subitamente (e sutilmente) somos desviados em direção à ambígua expressão “dualismo onda-partícula” e sua consequente indeterminação ontológica: um objeto quântico não é nem onda, nem partículas, muito menos, ‘ondículas’ (CORDOVIL, 2012, p. 18)

Deste modo, PESSOA JR (2003) reforça o entendimento sem dubiedade sobre o experimento da dualidade onda-partícula, a luz da interpretação da Complementaridade da MQ:

Um sistema quântico ou exibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórias (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo. (p.28)

2.8 SUPERPOSIÇÃO QUÂNTICA, A EXEMPLO DO GATO DE SCHRODINGER

A superposição quântica pode ser bem representada através do experimento mental, proposto pelo físico Erwin Schrodinger, no qual buscava uma descrição das características peculiares da mecânica quântica, criticando a interpretação da escola de Copenhague.

O experimento desenvolvido por Schrodinger consiste em imaginar uma caixa “contendo um gato, um frasco de gás venenoso, [martelo] e átomo radioativo, que tem uma probabilidade de 50% de decair no espaço de tempo de 1 hora. Se decair, coloca em funcionamento um mecanismo que libera o gás venenoso, que pode matar o gato. Uma hora se passa. Em qual estado estará o gato?” (SOBRAL E MACHADO, 2019),

O estado que está o gato depende do decaimento ou não da partícula radioativa, em outras palavras, o comportamento desse objeto quântico, caracterizado por 50% de ocorrer e 50% de não ocorrer, influenciará no possível estado do gato, vivo ou morto. Note que é preciso estabelecer o instante exato (antes da observação ou depois da observação) da análise do estado do gato, a fim de evitar uma confusão e dubiedade na interpretação. Contudo, a luz da interpretação de Copenhague, a natureza quântica do objeto prevê que não é possível afirmar o estado do gato, antes da observação, sendo nesse instante uma superposição de todos os estados possíveis: vivo, morto e vivo-morto (SANTOS, 2020, p.36).

Seria uma alternativa para o observador abrir a caixa para tomar conhecimento do estado atual do gato? Será possível obter dados e/ou afirmar o estado anterior ao ato de observar?

Schrodinger defende a ideia que o ato de observar influencia no estado quântico do sistema, “forçando” a assumir um dos possíveis estados, mas não necessariamente o anterior ao ato de medir. Ou seja, a interferência de um ente externo num sistema quântico (denominado na comunidade científica como decoerência quântica) possibilita uma “realidade”, a partir do momento que colapsa a função de onda, mas nada pode ser dito sobre o estado anterior.

Figura 15 - Imagem Ilustrativa do Experimento do Gato de Schrodinger



Fonte: <https://www.saberatualizado.com.br/2016/09/omisterio-gato-de-schrodinger.html>

Para entender melhor o experimento do gato de Schrodinger, vamos analisar o sistema átomo-gato:

Mesmo que, imediatamente após o decaimento atômico, o sistema seja criado no estado emaranhado, ele evoluirá muito rapidamente para o estado de superposição, portanto nunca veremos realmente o sistema átomo-gato no estado emaranhado. A razão para isso é conhecida como decoerência [...]. Com cuidado, os sistemas microscópicos podem ser colocados em estados emaranhados, mas o gato é um sistema macroscópico contendo da ordem de 10^{23} átomos, todos sujeitos a excitações térmicas que causam flutuações de fase. Para todos os efeitos, a coerência do sistema átomo-gato decai instantaneamente, deixando-o no estado de superposição (BECK, 2012, tradução dos autores)

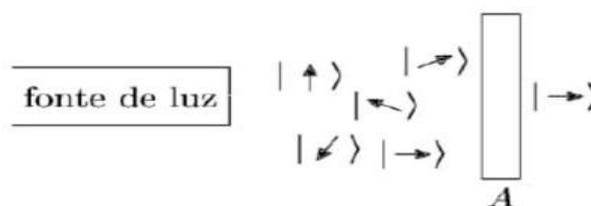
Dessa forma, é possível inferir que existe uma dificuldade experimental em emaranhar objetos macroscópicos, como por exemplo o gato, reforçando a ideia de um experimento paradoxal proposto por Schrodinger, vale lembrar que, além do exposto anteriormente, não é possível abrir a caixa para saber concretamente a “realidade”. De outro modo, como afirma BECK (2012) há casos onde ocorre o emaranhamento envolvendo objetos macroscópicos, por exemplo, “átomos em dois cristais de diamante em temperatura ambiente foram observados recentemente, [porém] esse entrelaçamento macroscópico persiste apenas em escalas de tempo de picossegundos”. Por fim, vale ressaltar que o experimento paradoxal do gato de Schrodinger é de grande valia, uma vez que possibilita o entendimento de uma interpretação razoável sobre objeto quântico.

2.9 POLARIZAÇÃO DE FÓTONS INDIVIDUAIS

Nesta subseção iremos analisar um experimento simples, retirado de SOBRAL e MACHADO (2019), envolvendo fótons, a fim de possibilitar uma maior familiarização com alguns fenômenos quânticos e realizar inferências sobre medições e a relação com filtros polarizadores. Para tanto, serão utilizados os seguintes equipamentos: uma fonte de luz forte, como um apontador laser, e três polaróides (filtros de polarização) que podem ser conseguidos em qualquer loja de suprimentos de câmeras.

Considerando um filtro A, polarizado horizontalmente, interagindo com um feixe de luz polarizada aleatoriamente é possível observar que os fótons de saída estão todos polarizados horizontalmente. A intensidade da luz que emerge do polarizador terá metade da intensidade da luz incidente. O filtro A medirá 50% de todos os fótons polarizados horizontalmente. Estes fótons passarão pelo filtro A e seu estado será $|\rightarrow\rangle$ (SANTOS 2020 p.41)

Figura 16- Imagem Ilustrativa da Polarização Linear da luz no regime clássico



Fonte: (CARDONHA; SILVA; FERNANDES, 2004)

Um fóton pode estar polarizado verticalmente (representado por $|\uparrow\rangle$) horizontalmente (representado por $|\rightarrow\rangle$), ou numa superposição destes estados, ou seja, $\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\rightarrow\rangle$, com $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$. Assumindo que a luz gerada é aleatoriamente polarizada, cerca de metade dos fótons emitidos serão polarizados horizontalmente por A e o atravessam. Note que A deixa passar apenas os fótons com $\alpha=0$ e $\beta=1$. De forma análoga, se considerarmos um filtro polarizador orientado verticalmente, somente passará pelo filtro os fótons orientados nessa direção.

Tomando o experimento de dupla fenda, descrito na seção 2.7, e reduzindo-o ao regime monofotônico, em vez das amplitudes de ondas clássicas, devemos considerar amplitudes quânticas ou amplitudes de probabilidade. Dessa forma, podemos considerar que

O conceito de amplitude de probabilidade, $A(y)$, cujo módulo ao quadrado é a probabilidade, isto é, $P(y) = |A(y)|^2$. A amplitude de probabilidade será a raiz quadrada da probabilidade mas terá uma fase que é função da posição. As amplitudes provenientes de cada fenda somam-se mas com uma diferença de fase correspondente à diferença de percurso, e que, portanto, depende da posição, y , no alvo (ALCÁCER, 2007, p.11).

A probabilidade do fóton ir da fonte até o anteparo (localizado atrás do filtro polarizador) é dada por $P = |c_1 + c_2|^2$. Uma vez que c_1 e c_2 são números complexos, teremos

$$P = |c_1 + c_2|^2 = |c_1|^2 + |c_2|^2 + 2|c_1| |c_2| \cos\theta \quad (53)$$

sendo θ o ângulo entre c_1 e c_2 no plano de Argand. Vale ressaltar que o último termo dá origem à interferência, a qual pode ser construtiva ou destrutiva.

Considerando que um fóton incidente no dispositivo está num estado de polarização designado por um vector unitário, ψ , com a forma (54) que corresponde uma função $\psi(z, t)$ de uma onda plana polarizada segundo e_p ,

$$|\psi\rangle = Ae^{i(kz-wt)}e_p \quad (54)$$

Esta onda plana pode designar uma amplitude de probabilidade associada ao fóton. Além disso, pode ser representado pela combinação linear dos estados de polarização horizontal (eixo Ox) ψ_x , e vertical (eixo Oy) ψ_y .

Note-se que, para o caso do campo electromagnético, podemos identificar as entidades abstractas ψ com o vector campo eléctrico, E . E uma vez que as equações de Maxwell são lineares e homogéneas podemos usar o princípio da sobreposição: se E_1 e E_2 são soluções dessas equações, então $E = c_1E_1 + c_2E_2$, (em que c_1 e c_2 são números complexos), é também uma solução. (ALCÁCER, 2007, p.32)

Quando um fóton atinge um polarizador A (orientado no eixo Ox), há duas possibilidades: ou passa, e fica no estado de polarização ψ_x , ou não passa. A probabilidade de passar é $\cos^2\theta$, onde θ é o ângulo entre o eixo do polarizador A e a direcção de polarização do fóton incidente. Vale salientar que o fóton não se divide e mantém a mesma energia (e comprimento de onda).

Se considerarmos um feixe de luz polarizado, formando um ângulo de 45° , ao incidir sobre um polarizador orientado horizontalmente, a componente x do vector campo eléctrico incidente passa pelo polarizador, já a componente y do vector campo eléctrico é “contida”. Ou seja, classicamente passa uma parte da luz, o que não ocorre no regime quântico. No regime monofotónico,

teremos fôtons em dois estados: 50 por cento no estado de polarização e_x , correspondendo portanto a uma probabilidade $p_x = 1/2$, e outros 50 por cento no estado de polarização e_y (probabilidade $p_y = 1/2$). A probabilidade de os fôtons no estado e_x passarem através do analisador é $P_{Ax} = |\langle A|e_x\rangle|^2 = |\cos(45^\circ)|^2 = 1/2$. De

modo idêntico, a probabilidade de os fótons no estado e_y passarem através do analisador é $PA_y = |\langle A | e_y \rangle|^2 = |-\sin(45^\circ)|^2 = 1/2$. Mas como está metade em cada estado, o número total de fótons que passam através do analisador é $PA = 1/2 PA_x + 1/2 PA_y = 1/4 + 1/4 = 1/2$. Quer dizer que passa metade do total de fótons ($1/4$ no estado e_x e $1/4$ no estado e_y) (ALCÁCER, 2007, p.36)

2.10 EMARANHAMENTO QUÂNTICO – ASPECTOS TEÓRICOS E CASOS EXEMPLARES

Um longo debate ocorreu no início da mecânica quântica, perdurando até os dias atuais, entre dois grupos que apresentam visões diferentes da realidade. Para Einstein, Podolsky e Rosen, físicos defensores da escola realista da mecânica quântica, a realidade podia ser percebida a partir do momento que pudessem prever determinadamente o valor de uma quantidade física sem perturbar o sistema, assim existe um elemento de realidade correspondente a essa quantidade física. Já a versão da escola ortodoxa (Copenhague) prevê que

a função de onda Ψ contém toda a informação sobre um estado. Para uma quantidade fisicamente observável existe um operador A que ao atuar sobre uma autofunção Ψ_a resulta em $\Psi'_a \equiv A\Psi_a = a\Psi_a$. Onde a é um autovalor que pode ser medido. Dessa forma, a observável A tem certamente o valor a quando o sistema está no estado Ψ_a , ou seja, existe um elemento de realidade correspondente a A . (HENRIQUE, 2014 p.1)

A escola realista, através de um experimento mental (gedanken experiment), buscou evidenciar que a mecânica quântica não é uma teoria física completa, faltando a função de onda que descreve o estado emaranhado e propondo a inserção de variáveis ocultas ao sistema. Esse experimento ficou denominado como paradoxo EPR (Einstein, Podolsky e Rosen).

O exemplo clássico de entrelaçamento quântico é chamado o paradoxo EPR (Einstein, Podolsky e Rosen). Em uma versão simplificada deste caso, considere uma partícula quântica com rotação 0 que se decompõe em duas novas partículas, partículas A e B. Cada partícula, A e B, encabeçam em direções opostas. No entanto, a partícula original tinha um spin quântico 0. Cada uma das novas partículas tem um spin quântico $1/2$, mas, como elas têm que se somar e resultar a 0, uma deve ser $+1/2$ e outra, $-1/2$. Esta relação significa que as duas partículas estão emaranhadas. (SOBRAL E MACHADO, 2019,p.86)

Vale ressaltar que é preciso ter um cuidado com os termos clássico e quântico, uma vez que apresentam princípios epistemológicos antagônicos na física. Na citação anterior “o exemplo clássico do entrelaçamento quântico”, o autor ao utilizar o termo clássico remete-se a um exemplo paradigmático, sendo assim não deve ser confundido com o ramo da física que apresenta ideias dicotômicas. Além disso, utilizar o termo partícula no regime quântico dar

margem para dúvida, sendo que o conceito de partícula é clássico e deve ser entendido como um possível comportamento de um objeto quântico.

O estado quântico de um sistema físico pode ser caracterizado por um conjunto de observáveis que podem ser medidas simultaneamente sem alterar o próprio estado. Significa dizer que os operadores hermitianos que representam essas observáveis comutam entre si. Geralmente, como a evolução temporal dos estados é governada pelo operador hamiltoniano, H , via equação de Schrödinger, escolhe-se o conjunto completo de observáveis que comutam com o operador H . Um dos casos mais conhecidos é o do átomo de hidrogênio para o qual os vetores de estado são descritos pelo número quântico principal (n) relacionado aos autovalores do hamiltoniano, pelo número quântico secundário (l) associado ao quadrado do momento angular e número quântico magnético (m) devido à componente z do momento angular. O vetor de estado do átomo de hidrogênio, $|n, l, m\rangle$, representado na base de posições pode ser escrito da seguinte forma: $\psi_{n,l,m}(\vec{r})$.

O experimento mental concebido pelos físicos realistas Einstein, Podolsky e Rosen, experimento EPR, proporcionou um embate epistemológico com os defensores da escola ortodoxa, porém esse embate ganhou maiores proporções quando John S. Bell através de um formalismo matemático demonstrou que, devido às suas fortes condições de localidade, as teorias de variáveis ocultas eram restritas a certas desigualdades que não são sempre obedecidas pela Mecânica Quântica.

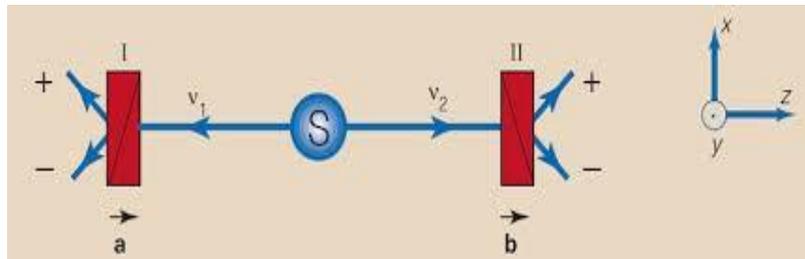
Para construir seu formalismo matemático, Bell utilizou uma versão do EPR Gedanken experimentem que um sistema emaranhado composto por duas partículas com spin $1/2$ está no estado singleto. As componentes de spin em várias direções são as observáveis não-comutantes que podem ser medidas. O estado do sistema combinado deve ser sempre singleto. Com esses argumentos Bell tirou a discussão fomentada pelo paradoxo EPR da cena epistemológica e a levou para o ramo matemático, criando desigualdades que podem ser testadas experimentalmente e modificadas conforme a natureza do experimento. (HENRIQUE, 2014, p.2)

Bell estabeleceu essas desigualdades a partir da ideia que existem variáveis ocultas e não existem efeitos não-locais, consonante com a escola realista da mecânica quântica. Contudo, em 1982, Alain Aspect realizou uma experiência e descobriu que as desigualdades de Bell eram violadas. Logo, “o resultado obtido por Alain Aspect indica que não podemos explicar o comportamento correlacional de um sistema emaranhado por variáveis ocultas” (HENRIQUE, 2014 p.4).

O experimento realizado por Aspect foi de grande relevância para mecânica quântica, uma vez que corroborou para o entendimento e melhor descrição dos fenômenos quânticos ao descartar a teoria de variáveis ocultas. Vale ressaltar que o experimento de Aspect foi

confirmado, posteriormente, por Weihs e Rowe. Para desenvolver o aparato experimental, Aspect baseou-se na interpretação óptica do paradoxo EPR, como mostrado na figura 17.

Figura 17- Interpretação óptica do EPR Gedankenexperiment.



Fonte: Alain Aspect, 1999.

Na interpretação óptica, uma fonte emite pares de fótons fortemente correlacionados. Medidas da correlação entre as polarizações lineares dos dois fótons são feitas. Como mostra a Figura 12, dois fótons v_1 e v_2 são analisados pelos polarizadores lineares I e II, que fazem medidas ao longo dos eixos a e b perpendiculares a z . Cada medida tem dois possíveis resultados: $+$ ou $-$. As probabilidades das medidas realizadas nos fótons individuais podem ser encontradas para várias orientações dos polarizadores. Cada fóton pode ser encontrado aleatoriamente nos canais $+$ e $-$. Mas se o fóton v_1 é encontrado positivamente polarizado, seu fóton gêmeo v_2 também é encontrado positivamente polarizado. (HENRIQUE, 2014 p.4)

Quando um átomo absorve energia suficiente para alcançar um nível energético superior e, posteriormente volta ao seu estado inicial, emite fóton. Já, no caso do átomo de cálcio, ao retornar para seu estado inicial, emite dois fótons emaranhados.

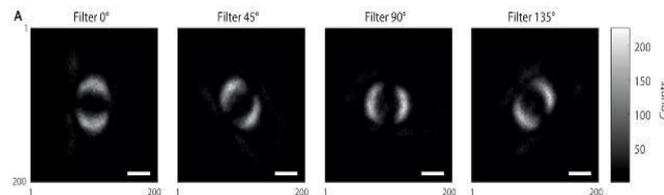
Diz-se que os fótons estão emaranhados - o resultado da medição do spin de um fóton automaticamente determina o resultado do spin do outro fóton, muito embora, inicialmente, nenhum fóton possua um spin definido, mas apenas uma onda de probabilidade que deixa espaço igual para spins à esquerda ou à direita. Ao menos, esse é um ponto de vista amplamente aceito pelos físicos (SOBRAL E MACHADO, 2019).

O caso do emaranhamento entre dois objetos quânticos, A e B, é possível observar que quando se mede uma propriedade do objeto A, a medida tem um impacto sobre os possíveis resultados da medição da propriedade do objeto B. Contudo, não se trata apenas de uma “previsão teórica interessante, mas foi verificada experimentalmente através de testes de Teorema de Bell” (SOBRAL E MACHADO, 2019, p.85).

Recentemente, ao publicar um artigo na revista Science Advances, físicos da Universidade de Glasgow, na Escócia, explicaram como tornaram o “fantasma de Einstein” visível em uma imagem pela primeira vez, figura 18.

Eles desenvolveram um sistema que dispara um fluxo de fótons emaranhados, a partir de uma fonte quântica de luz, sobre “objetos não convencionais” que são exibidos em materiais de cristal líquido, que alteram a fase dos fótons à medida que eles passam através desses materiais. A equipe montou uma câmera super-sensível capaz de detectar fótons individuais, que só tiraria fotos quando detectasse tanto um fóton quanto seu “gêmeo” emaranhado, criando um registro visível do emaranhamento dos fótons. (SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, 2019)

Figura 18: Entrelaçamento quântico foi fotografado pela primeira vez no início de 2019



(Foto: Universidade de Glosgow/Science Advances)

Segundo Viggiano (2019), os cientistas tornaram perceptível o fenômeno do emaranhamento entre as partículas ao dividir a órbita de um fóton em três partes muito próximas entre si e conseguiram criar um qutrit, assim produzindo seu entrelaçamento. Mas, quais são os estados das partículas emaranhadas antes da observação? São os mesmos quando medido?

O estado de superposição dos objetos quânticos impossibilita a determinação dos estados das partículas emaranhadas antes da medição, uma vez que trata-se de uma propriedade fundamental da mecânica quântica e não uma incerteza devido a falta de conhecimento. Esta afirmação é melhor modelada pelo experimento mental quântico paradigmático da Física, o gato de Schrödinger (seção 2.8). Portanto, as partículas emaranhadas realmente não têm um estado definitivo antes da mensuração, mas uma onda de probabilidade e o resultado da medição de um fóton automaticamente determina o resultado do outro fóton.

2.11 EMARANHAMENTO DE FÓTONS E O OSCILADOR PARAMÉTRICO ÓTICO (OPO)

Nesta subseção faremos uma breve explanação sobre os elementos básicos que compõem experimento do Oscilador Paramétrico Ótico (OPO) e como se dá a produção de fótons emaranhados neste dispositivo.

O Oscilador Paramétrico Ótico consiste essencialmente de uma cavidade ótica e um cristal com susceptibilidade não-linear (χ). Neste dispositivo, um feixe é emitido por uma fonte de laser direcionado para o cristal não-linear, esta interação não ressonante implica na

conversão de dois outros feixes de frequências mais baixas (ω_1 e ω_2). Doravante, utilizaremos o termo feixe de bombeio para o feixe de entrada e feixes sinal e complementar para aqueles com frequências menores.

Se considerarmos a intensidade do feixe de laser reduzida até a emissão de um fóton por vez, começa a aparecer os efeitos quânticos. Quanticamente, o OPO converte um fóton do bombeio em um par de fótons nos modos sinal e complementar, gerando correlações quânticas entre os feixes. A cavidade seleciona modos preferenciais para sinal e complementar, permitindo a oscilação do sistema em regime contínuo (VILLAR, 2004, p.45).



Fonte: COELHO, 2009.

Vale salientar que o princípio da conservação de energia é válido, sendo assim, a soma das frequências dos feixes produzidos deve ser igual à frequência do feixe de bombeio,

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$$

O cristal não-linear atua como meio de ganho de amplitude para os feixes sinal e complementar com a consequente diminuição da amplitude do feixe de bombeio. Quando o ganho total supera as perdas totais a produção de feixes tem início. Sendo as perdas independentes do campo de entrada e o ganho dependente deste, a oscilação só inicia quando o feixe de bombeio atinge uma potência característica, denominada potência limiar. (COELHO, 2009, p.39)

O OPO é uma fonte de estados não-clássicos da luz e está associado a correlações quânticas, uma vez que produz feixes não-degenerados em frequência acima do limiar e vácuo comprimido abaixo do limiar de oscilação. Convém lembrar que as correlações quânticas podem ser entendidas quando analisamos o campo em termos de fótons (ver seção 2.6).

COELHO (2009) destaca sobre o processo de produção de fótons emaranhados no OPO :

Um par de fótons dos feixe sinal e complementar é produzido pela aniquilação de um fóton do feixe de bombeio. Estes fótons permanecem na cavidade, em média, durante um tempo τ_{cav} , portanto, no domínio da frequência, o ruído na diferença das intensidades dos campos deve apresentar compressão para frequências abaixo de $1/\tau_{cav}$. Foi observada experimentalmente por Heidmann et all (Heidmann, 1987) uma compressão na subtração das intensidades cerca de 30% abaixo do shot-noise, o que motivou o nome “fótons gêmeos” para sinal e complementar...

No OPO, o feixe de bombeio tem seus fótons aniquilados criando fótons aos pares nos

modos sinal e complementar. Os operadores \hat{a}_j e \hat{a}_j^\dagger são os operadores de criação e

aniquilação, com $j \in \{0,1,2\}$ referente aos modos de bombeio, sinal e complementar,

respectivamente. Dessa forma, podemos escrever a hamiltoniana que descreve a interação dos campos através da não-linearidade é dado por:

$$\hat{H} = 2\hbar \left(\hat{a}_0 \hat{a}_1 \hat{a}_2 - \hat{a}_0^\dagger \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger \right) \quad (55)$$

Em que τ é o tempo que o fóton leva para dar uma volta completa dentro da

cavidade. Vale ressaltar que o primeiro termo descreve a aniquilação do fóton referente ao feixe de bombeio com a consequente criação do par de fótons nos modos sinal e complementar,

A existência de correlações quânticas envolvendo as fases do campo, possibilitou a primeira previsão de emaranhamento entre os fótons gêmeos, demonstrado experimentalmente em um OPO degenerado em frequência abaixo limiar e acima do limiar para o caso não degenerado. (VILLAR, 2005,p.45).

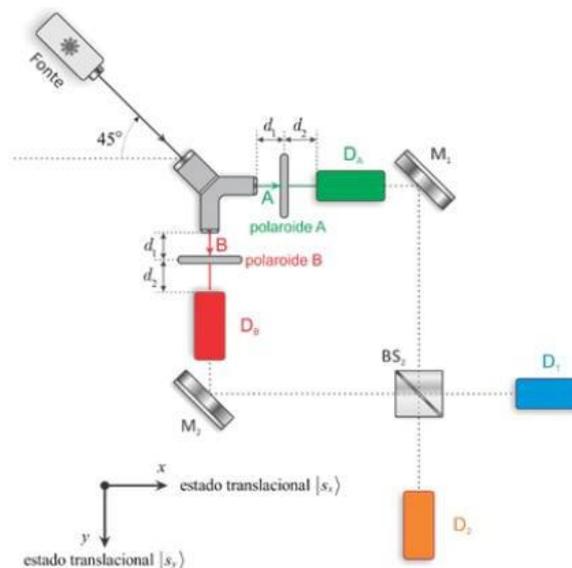
2.12 EMARANHAMENTO QUÂNTICO NO OSCILADOR PARAMÉTRICO ÓTICO VIRTUAL (OPOV)

A proposta desse trabalho é analisar a experiência da luz no regime quântico, a fim de reconhecer o fenômeno físico do emaranhamento quântico de fótons polarizados. Para tanto, utilizaremos uma simulação adaptada do Interferômetro virtual de Mach- Zehnder (NETTO,CAVALCANTI e OSTERMANN, 2019), no qual os espelhos (semi)refletores serão

substituídos por um cristal não linear, filtros polarizadores e fotodetectores, como ilustrado na figura 20. Vale salientar que ao modificar o software foi feita uma adaptação do experimento virtual utilizando o OPO. Doravante, chamaremos de OPOV o software que utilizamos na SD.

Lembremos que para analisar o fenômeno físico do emaranhamento quântico de fótons polarizados é necessário reduzir a taxa de números de fótons emitidos pela fonte, buscando chegar ao limite da emissão de um fóton por vez, ou seja, o regime monofotônico. Este tipo de emaranhamento está relacionado com pares de fótons que estão correlacionados em relação a dois parâmetros físicos: polarização e a direção de propagação e são originados através da interação do fóton com o tipo de cristal não linear.

Figura 20 – Diagrama simplificado do IVMZ adaptado para simulação do emaranhamento quântico - OPOV.



Fonte: (NETTO; CAVALCANTI e OSTERMANN, 2019)

A versão do Oscilador Paramétrico Ótico Virtual (OPOV) utilizado na SD possui os seguintes elementos: Fonte laser, cristal não-linear (em formato de Y), dois filtros polarizadores (A e B) e dois fotodetectores (vermelho e verde), ver figura 21. Neste aparato experimental, o feixe de bombeio incide no cristal não-linear, onde ocorre a criação de dois fótons que são direcionados para os filtros polarizadores e, por conseguinte, para os fotodetectores. Este último, está calibrado para registrar apenas detecções simultâneas, uma vez que garantido a emissão de um fóton por vez, caracteriza o fenômeno físico do emaranhamento de fótons polarizados. Os detectores utilizados no OPOV são detectores de demolição, isto é, eles absorvem o fóton no mesmo estado, de forma que se pode considerar

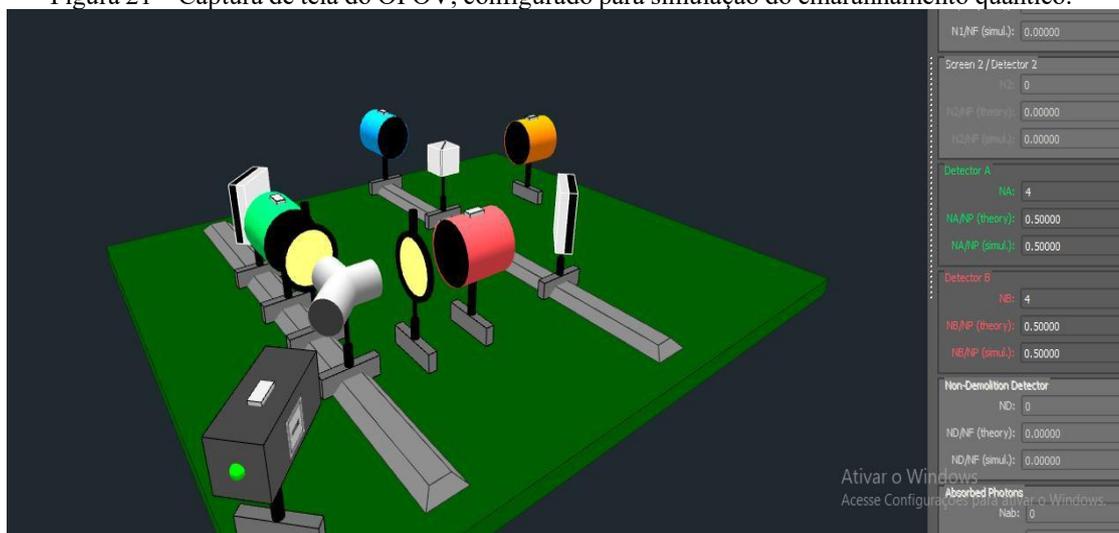
que o fóton detectado permanece no mesmo autoestado, porém com perda líquida de energia.

Em outras palavras, o OPOV funciona da seguinte forma:

a fonte emite um fóton de cada vez, com polarização a 45 graus, e este é convertido em um par de fótons emaranhados em estados de polarização. []. Após os polaroides há dois detectores, DA e DB , que detectam e absorvem os fótons, de modo que não há interação com os demais dispositivos. Os índices A e B fazem referência aos braços do interferômetro e, neste caso, há um fóton do par associado a cada braço. A compreensão do fenômeno requer que se interprete as contagens de fótons nos detectores A e B, mas, para isso, é preciso antes reconhecer as características do par produzido. (NETTO et. all, 2019,p.13)

No OPOV ocorre a polarização paralela dos “fótons gêmeos”. Na prática, se houver a determinação que uma dessas partículas de luz vibra na posição vertical, a outra, sua parceira no conjunto quântico, só pode oscilar na mesma direção, conseqüentemente, havendo detecções simultâneas. Na prática, se houver a determinação que uma dessas partículas de luz vibra na posição vertical, a outra, sua parceira no conjunto quântico, só pode oscilar na mesma direção, conseqüentemente, havendo detecções simultâneas.

Figura 21 – Captura de tela do OPOV, configurado para simulação do emaranhamento quântico.



Fonte: (NETTO; CAVALCANTI e OSTERMANN, 2019)

Quanticamente, o polarizador atua na luz como um processo irreversível, e pode-se dizer que este dispositivo funciona como uma medição do observável associado à polarização, seguindo o segundo postulado.

Se o fóton está em um dos autoestados de polarização do i-ésimo polarizador, o resultado desta interação é completamente determinado: será certamente transmitido, se ele estiver no autoestado “transmissão”, ou será certamente absorvido, se ele estiver no auto estado absorção. Além disso, quando o fóton se encontrar no

autoestado de transmissão, seu estado de polarização não será alterado após a sua interação com este polarizador; no caso do autoestado de absorção, o fóton é absorvido e desaparece. (PESSOA JR. 2020, p.13)

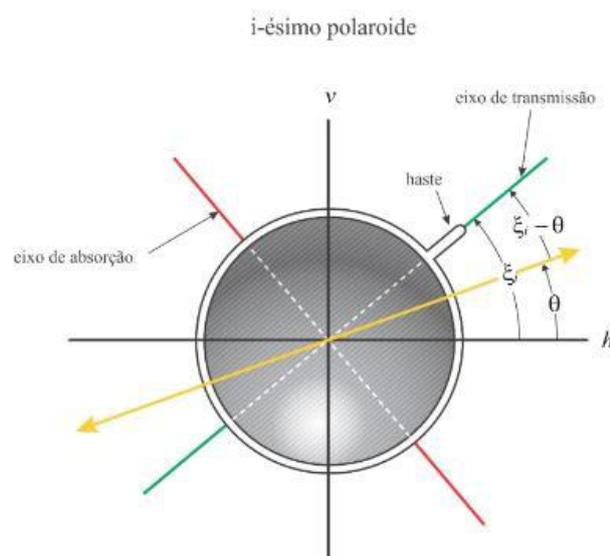
Consonante com o quinto postulando da MQ, a interação com o i -ésimo polarizador projeta o estado de polarização dos fótons transmitidos para o autoestado de transmissão do mesmo.

Note-se que não existe emaranhamento quântico sem a existência dos polarizadores e

no OPOV estes são ideais, ou seja, a absorção ou transmissão dos fótons é análogo ao regime

clássico, os fótons interagem com o polarizador e podem ser absorvidos ou transmitidos, dependendo da orientação dos eixos de absorção e transmissão. Contudo, agora, é preciso analisar os dois entes quânticos para descrever corretamente o sistema e a probabilidade de transmissão ou não.

Figura 22 – Representação esquemática de um polaróide do OPOV.



Fonte: (NETTO; CAVALCANTI e OSTERMANN, 2019)

A probabilidade de detecção dos fótons emaranhados é dado por :

$$P_{AB} = \frac{1}{2} \cos^2(\xi_A - \xi_B) \quad (56)$$

Em que ξ é o ângulo formado entre os polarizadores ($\xi_A - \xi_B$). Além disso, cada uma das

direções (vertical e horizontal) de polarização possui probabilidade 1/2 de ocorrer e para os

casos que estes estão perpendiculares não existem detecções simultâneas.

A probabilidade de os detectores A e B dispararem ao mesmo tempo (cada um acusa um fóton do par – o que se chama coincidência) após a interação dos fótons com os polaroides é igual à probabilidade de ambos serem absorvidos e não haver nenhuma detecção. Essa probabilidade depende da orientação relativa entre os eixos de

transmissão dos polaroides, sendo dada por $p_{AB} = (1/2) \cos^2(\xi_A - \xi_B)$. Para que os detectores A e B registrem detecção em coincidência, ambos os fótons precisam ser transmitidos nos polaroides posicionados nos braços do interferômetro. [] Na atual versão do software, apenas as coincidências são registradas. (NETTO, CAVALCANTI E OSTERMANN, 2019,p.34)

2.13 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DO EQ

A teoria da MQ está intimamente ligada com os avanços tecnológicos dos séc. XX e XXI, seja para entendimento e descrição dos fenômenos físicos, bem como para as aplicações tecnológicas necessárias na sociedade atual. Neste contexto:

Nasce uma nova disciplina, a informação quântica, que exige colaboração interdisciplinar, e busca uma nova compreensão sobre os processos de transmissão, armazenamento, compactação e computação propiciados pela física quântica, com a promessa de utilização de propriedades quânticas para aumentar a eficiência desses processos. (DAVIDOVICH, 2015,p.10)

DAVIDOVICH (2015) defende que a tecnologia quântica emerge com os avanços na área da informação quântica, uma vez que experimentos sofisticados não permitem apenas de efeitos sutis no âmbito da Física, mas viabilizam aplicações inovadoras, como na informação e a computação quântica.

SOBRAL e MACHADO (2019) afirmam que o entrelaçamento quântico é a base para tecnologias emergentes, tais como computação quântica, criptografia quântica e tem sido usado para experiências como o teletransporte quântico. Os diferentes enfoques sobre o que está a acontecer no processo do entrelaçamento quântico evidenciam diferentes interpretações da mecânica quântica.

Analisando o exemplo do computador quântico, existem estudos que comprovam através dos princípios fundamentais da MQ uma maior eficiência na velocidade e segurança da informação.

A computação quântica lida com bits quânticos (qbits), que generalizam o conceito de bit, unidade fundamental de informação em computação clássica e que pode ter os valores 0 ou 1. O qbit, por sua vez, pode ser expresso por uma superposição de 0 e 1. Um exemplo físico de qbit é a polarização de um fóton. Uma luz polarizada linearmente comporta-se como uma corda vibrante, que oscila em um plano. O fóton pode ter polarização ao longo de um plano horizontal - o que corresponderia, por exemplo, ao valor 0 do bit - ou vertical (valor 1), mas pode também ter polarização ao longo de um plano inclinado, que seria representada em física quântica como uma superposição dos dois 'estados de polarização' (horizontal e vertical). Essa liberdade em relação aos bits clássicos, que só podem ter os valores 0 e 1, é a base da criptografia quântica e da computação quântica. (DAVIDOVICH, 2015,P.11)

A computação com os algoritmos clássicos possui problemas em relação a busca em banco de dados e fatoração de números em fatores primos, uma vez que

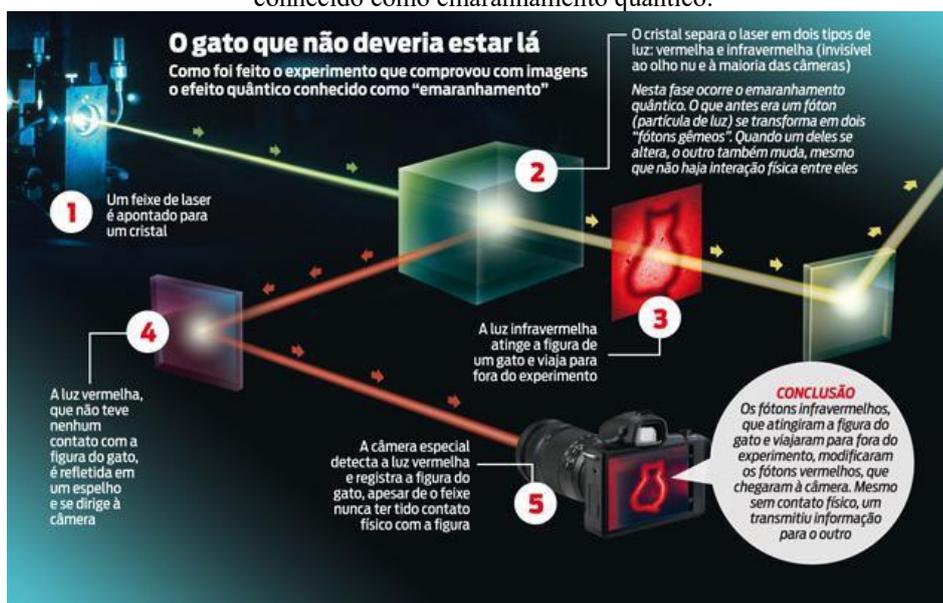
o melhor algoritmo de fatoração conhecido, para computação clássica, requer um tempo de computação que cresce exponencialmente com o comprimento do número - por isso mesmo, a fatoração de números é um ingrediente essencial nos métodos criptográficos mais usados atualmente, por exemplo na transmissão de dados pela internet. (DAVIDOVICH, 2015, P.12)

Diante desta situação o EQ possui um papel fundamental nos computadores quânticos, uma vez que possuem propriedades próprias de conhecimento do sistema combinado, independente de saber as informações dos sistemas individuais. Em outras palavras, o estado quântico do sistema constituído por dois fótons emaranhados polarizados é uma das duas possibilidades individuais.

DAVIDOVICH (2015) descreve um experimento realizado que comprova uma das grandes utilidades tecnológicas do EQ associado ao compartilhamento de informações, como representado na figura 22. Inclusive, uma das formas de produção deste fenômeno físico nos laboratórios de todo o mundo, até mesmo no Brasil:

Cristais especiais, iluminados por feixes de laser na região ultravioleta, emitem pares de fótons na região do infravermelho. Cada fóton absorvido leva à emissão de um par de fótons, de modo que, desprezando perdas de energia no cristal, a soma das energias dos fótons emitidos deve ser igual à energia do fóton incidente, o que explica a diferença de cor entre os fótons absorvidos pelo cristal e os pares de fótons emitidos. Sob certas condições, os pares de fótons são produzidos de modo que ambos têm mesma polarização (o que exemplifica uma informação de natureza global sobre o sistema), mas essa polarização não é definida (refletindo a ignorância sobre a polarização de cada fóton) - o estado quântico do sistema de dois fótons é uma superposição das duas possibilidades: por exemplo, ambos os fótons com polarizações horizontais ou verticais. (DAVIDOVICH, 2015).

Figura 22 - Imagem ilustrativa do experimento que comprovou com imagens, o efeito quântico conhecido como emaranhamento quântico.



Fonte: LEMOS et al (2014)

A Figura 22 ilustra o processo de formação de fótons emaranhados ao interagirem com o tipo de cristal não-linear e a informação sendo compartilhada entre os fótons gêmeos até a detecção da imagem do gato numa câmera específica.

O grande desafio para a realização de aplicações confiáveis na área de informação quântica é a realização de operações precisas sobre átomos e fótons, e o combate a efeitos do ambiente que afetam estados quânticos e, em particular, destroem o emaranhamento. Estudos sobre esses efeitos têm sido realizados [25-28], e novas ideias aparecem visando a proteção de estados quânticos. (DAVIDOVICH, 2015)

3.0 REFERENCIAL TEÓRICO - METODOLÓGICO - LEV VYGOTSKY

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico - metodológico utilizado para estruturação da sequência didática Lev Semionovitch Vygotsky, bem como seus conceitos-chaves, sendo eles mediação social e mediação semiótica e suas implicações no processo de desenvolvimento do indivíduo para aquisição de novos conhecimentos. Além disso, será mostrado a influência da teoria sociointeracionista contextualizada no ensino de física.

3.1 MARXISMO IMPLÍCITO NA TEORIA VYGOTSKIANA

Lev Vygotsky foi um dos maiores psicólogos do século XX, nasceu em novembro de 1896, em Orsha, país da antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), país que historicamente, foi berço do socialismo expresso na teoria de Karl Marx. Segundo DELL'ISOLA e MEDEIROS (2016), a teoria vygotskiana sofreu relevantes influências do pensamento Marxista e de Engels, principalmente, relacionado ao conceito ontológico do trabalho humano, o uso dos instrumentos e a interação dialética entre o homem e a natureza.

Tão logo o processo de trabalho esteja em alguma medida desenvolvido de todo, necessita ele de meios de trabalho já trabalhados. Nas cavernas humanas mais antigas encontramos instrumentos de pedra e armas de pedra. Ao lado de pedra, madeira, osso e conchas trabalhados, o animal domesticado e, portanto, já modificado por trabalho, desempenha no início da história humana o papel principal como meio de trabalho. O uso e a criação de meios de trabalho, embora existam em germe em certas espécies de animais, caracterizam o processo de trabalho especificamente humano e Franklin define, por isso, o homem como a toolmaking animal, um animal que faz ferramentas. (MARX, 2002)

VYGOTSKY (2008) estabelece que o processo de evolução do ser humano é mediado, sendo fundamental as ferramentas ou instrumentos durante o processo de desenvolvimento das funções psicológicas superiores. Além disso, considerava estas funções “os diversos sistemas de contagem, as técnicas mnemônicas, os símbolos algébricos ou quaisquer outras ferramentas psicológicas capazes de organizarem e aprimorarem as funções mentais” (DELL'ISOLA e MEDEIROS, 2016, p.3). Vale salientar que o papel dessas funções são compreendidas através da:

análise de Vygotsky sobre as relações entre desenvolvimento e aprendizagem, no caso da aquisição da linguagem, nos conduz a definir o primeiro modelo de desenvolvimento: em um processo natural de desenvolvimento, a aprendizagem aparece como um meio de reforçar esse processo natural, pondo à sua disposição os instrumentos criados pela cultura que ampliam as possibilidades naturais do indivíduo e reestruturam suas funções mentais (VYGOTSKY, 1998,p.84).

A perspectiva sociocultural de Vygotsky apresenta, de forma implícita, a influência de Marx, ao conceber as ferramentas psicológicas como sociais (OLIVEIRA,1993). A estrutura cognitiva do indivíduo não é algo imutável, bem definido, sem possibilidades de mudanças, muito pelo contrário. A partir do momento que ocorre uma ação na ZDP, os conceitos que estavam consolidados nas funções psicológicas sofrem uma mudança, bem como o conceito que foi utilizado durante a mediação. Perceba que fica explícito nesta situação o materialismo dialético, conceito central no ideal marxista, associado as funções mentais,

as ferramentas psicológicas nem são inventados por cada indivíduo, nem descobertas em uma interação independente do indivíduo com a natureza. Além disso, elas não são herdadas na forma de instintos ou reflexos incondicionados. Em vez disso, os indivíduos têm acesso às ferramentas psicológicas em virtude de estarem inseridas em um meio sociocultural e serem capazes de se apropriarem de cada uma dessas ferramentas de mediação (DELL'ISOLA e MEDEIROS, 2016 p.3)

Note-se que este aspecto social inerente as teorias Vigotskiana e Marxista pressupõe não apenas uma análise macro, mas também uma análise individualizada, abrindo caminhos para estudo dos signos (mediadores semióticos). Convém dizer que as ideias de Vygotsky trouxeram uma revolução a sua época, uma vez que os ideais Piagetianos previam que a maturação biológica e o desenvolvimento cognitivo eram suficientes para evolução na aquisição de novos conceitos.

3.2 MEDIAÇÕES SOCIAL E SEMIÓTICA - ZONAS DE DESENVOLVIMENTO

Segundo SANTOS (2020), Vygotsky concebe o ser humano como um ser histórico e cultural, marcado por relações de mediação e essa concepção de que é o aprendizado no meio social, onde o indivíduo está inserido, que possibilita avanços nas funções psicológicas

superiores. A tese sócio-cultural defendida por Vygotsky prevê que as pessoas precisam do suporte de outras pessoas para amadurecerem e desenvolverem plenamente. Nesse contexto da relação entre desenvolvimento e aprendizado surge uma das ideias centrais da teoria: o conceito de zona de desenvolvimento proximal.

A compreensão da ZDP só é possível, quando bem estabelecidos os conceitos das zonas de desenvolvimento real e potencial, pois estes caracterizam os estágios atual e desejado em relação a aquisição de novos conhecimentos pelo aprendiz. Uma ação intencional por parte do docente é necessária para que ocorra uma diminuição entre estes dois extremos. Logo, torna-se fundamental perceber, como ilustrado na figura 16, a ponte que precisa ser percorrida para lograr êxito no objetivo previamente estabelecido.

Figura 23: Ilustração das zonas de desenvolvimento, previsto na teoria Vygostkiana



Fonte: PIOVESAN et al, 2018.

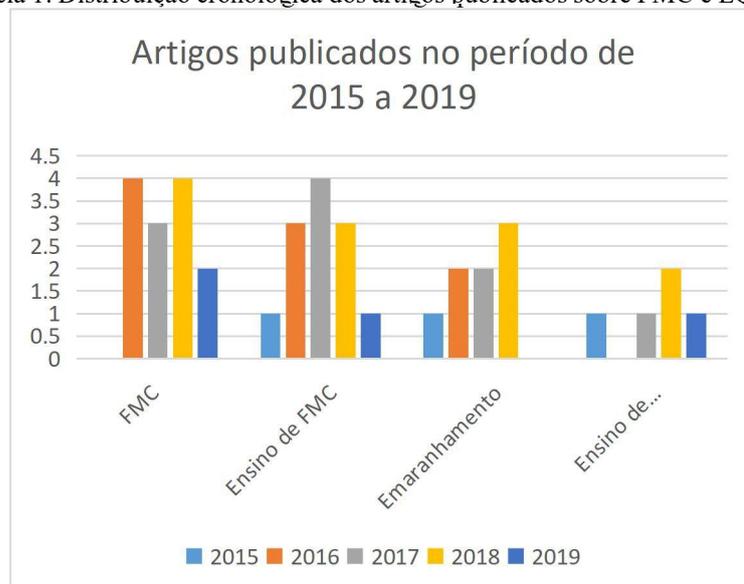
A zona de desenvolvimento proximal define aquelas funções que ainda não amadureceram, mas que estão em processo de maturação, funções que amadurecerão, mas que estão presentemente em estado embrionário. Essas funções poderiam ser chamadas de 'broto' ou 'flores' do desenvolvimento, ao invés de frutos do desenvolvimento (VYGOTSKY, 1994, P.97)

A compreensão do processo de construção dos significados está intimamente ligado com a mediação semiótica, uma vez que “o recurso às palavras para aprender a orientar os processos mentais pessoais é parte integrante do processo de formação dos conceitos” (VYGOTSKY, 1998). MACHADO (2001) reforça que a aquisição de conceitos científicos ocorre por meio de relações mediadas, essencialmente, por conceitos, sendo necessário o cuidado com as palavras para uma maior eficácia na mediação dita semiótica.

Por outro lado, um outro termo bastante utilizado na teoria Vygotskiana é o de parceiro “mais capaz”, porém, este termo quando analisado fora da teoria de Vygotsky pode ser facilmente interpretado como algo que delimitada as funções psicológicas superiores do indivíduo. Contudo, um parceiro “mais capaz” pode ser compreendido no seio desta teoria, por exemplo, como uma criança inglesa (bilingue) que deseja ir a padaria comprar pão. Se colocarmos um adulto brasileiro sem experiência com a língua inglesa, ele necessitaria de ajuda desta criança. Logo, o parceiro mais capaz nesta mediação social não está associado as questões biológicas, no qual a mediação prevê a valorização do outro social no processo de aprendizado.

3.3 ENSINO DE EMARANHAMENTO QUÂNTICO

Tabela 1: Distribuição cronológica dos artigos publicados sobre FMC e EO,-2015 a 2019



Fonte: autores do trabalho

Durante a elaboração do trabalho de conclusão de curso sob o título “O ensino de emaranhamento na educação básica: uma proposta sociointeracionista de sequência didática”, o autor deste trabalho realizou uma revisão de literatura buscando perceber os trabalhos com a

temática do EQ, bem como os que aplicaram numa sala de aula, sendo possível perceber um número baixo de trabalhos que abordam conceitos da MQ, sendo ainda mais difícil encontrar trabalhos com viés do emaranhamento, seja na área de pesquisa como na aplicação em sala de aula. Vale ressaltar que há uma crescente nos trabalhos que abordam tópicos de FMC devido o incentivo do MNPEF - POLO 06 - UEFS, sendo perceptível grandes trabalhos nessa linha de pesquisa.

Segundo BRASIL (2018), O currículo no ensino de física precisa ser repensado afim de desenvolver as competências e habilidades pelo educando prevista na nova BNCC. Desta forma, Ostermann e Moreira (2000) reforçam a necessidade de amadurecimento da linha de pesquisa ensino de FMC no ensino médio, uma vez que há muitas justificativas em favor da atualização curricular e até uma bibliografia que apresenta temas modernos. Entretanto, uma questão desafiadora é a escolha de quais tópicos de FMC deveriam ser ensinados nas escolas ou, o que dá no mesmo, de quais temas de FMC deveriam ser objeto de especial atenção na formação de professores de Física com vistas a uma adequada transposição didática para o ensino médio.

As contribuições da teoria sociointeracionista no ensino têm sido o foco de muitas pesquisas na área de educação, Coelho et.all (2018) afirma que é preciso analisar a importância da mediação para o ensino tendo como base os estudos de Vygotsky, uma vez que o professor é responsável pelo processo de mediação pedagógica no âmbito escolar, ou seja, o professor deve exercer um papel de “trampolim” entre os alunos e os novos conhecimentos. Em outras palavras, o professor deve buscar na sala de aula promover o desenvolvimento do alunado, intervindo na distância entre a zona de desenvolvimento real (aquilo que o aluno já aprendeu) e a zona de desenvolvimento potencial (aquilo que o aluno é capaz de realizar com ajuda do parceiro mais capaz), essa distância entre a zona de desenvolvimento real e zona de desenvolvimento potencial é denominado como Zona Desenvolvimento Proximal (ZDP). Kohl (1993) esclarece que “ a zona de desenvolvimento proximal refere-se, assim, ao caminho que o indivíduo vai percorrer para o desenvolver funções que estão em processo de amadurecimento e que se tornarão funções consolidada, estabelecidas no seu nível de desenvolvimento real” (SANTOS, 2020)

A área de ensino de física quântica na educação básica apresenta também trabalhos relevantes como os apresentados por SILVA NETO (2011) e PAGLIARINI E DE ALMEIDA (2016). SANTOS (2020) alerta para existência de poucos trabalhos na perspectiva Vygotskiana no ensino de física quântica, principalmente, tratando da aplicação de SD para ensino do emaranhamento quântico no EM. Contudo, podemos perceber que a área está em um processo de crescimento à medida que avançam os cursos de pós-graduação nessa linha de pesquisa, sendo possível perceber que há um caminho promissor ao seguir esse referencial teórico (SANTOS, 2020).

4. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE O CONCEITO DE EMARANHAMENTO NA EDUCAÇÃO BÁSICA

Nessa seção será apresentado a proposta de sequência didática sobre o conceito de emaranhamento quântico no ensino médio baseada na teoria de mediação social e semiótica de Lev semionovitch Vygotsky. Bem como, os registros oral e escrito dos estudantes durante a intervenção pedagógica.

4.1 ESTRATÉGIA DIDÁTICA

A SD está estruturada baseando-se no princípio vygotskiano que a aquisição de novos conceitos ocorre por meio de mediadores semióticos/simbólicos e sociais. Sendo fundamental a interação dialógica entre os sujeitos envolvidos no processo de ensino e aprendizagem numa sala de aula, notadamente professor e alunos, visando agir na zona de desenvolvimento proximal do aprendiz. Vale ressaltar que a estratégia didática adotada assume que a linguagem clássica precisa ser compreendida para comunicar resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido, evidentemente, consonante com os pressupostos epistemológicos.

Diante desse contexto, a aplicação da SD foi estruturada através de duas oficinas práticas sobre fenômenos ondulatórios, mais especificamente difração e interferência de ondas mecânicas e eletromagnéticas, totalizando 3 horas-aula. Em seguida, foram realizadas 6 horas-aula sobre polarização da luz e conceitos fundamentais da física quântica até chegar no emaranhamento quântico.

Oficina 1 - Exploração fenomenológica das ondas num “quebra-mar”

Inicialmente, vamos focar nas oficinas práticas realizadas, a primeira foi realizada na praia de Madre de Deus- BA, os estudantes foram conduzidos para região que contém um “quebra-mar” e orientados a fazerem um exploração fenomenológica, isto é, observação atenta e registros sobre as ondas que passavam pelas fendas do “quebra-mar”. Em seguida, houve um momento de interação dialogada professor-aluno e aluno-aluno, sendo predominante a mediação social, neste instante os estudantes foram provocados a explicar a interferência das ondas ao passar por fendas distintas.

Figura 24 – Ondas passando pelo “Quebra-Mar”.



Fonte: autores do trabalho

Figura 25: Análise fenomenológica feita por alunos do CEAB.



Fonte: autores do trabalho

Figura 26: Registro do momento de interação dialogada com alunos do CEAB.



Fonte: autores do trabalho

Oficina 2 - Atividade experimental com materiais de baixo custo envolvendo ondas mecânica e eletromagnética

Já a segunda oficina ocorreu na sala de aula do CEAB, os estudantes realizaram experimentos com materiais de baixo custo envolvendo laser, CD, bacia, água e pedrinhas. O objetivo foi possibilitar aos estudantes o entendimento sobre difração e interferência de ondas na bacia (e no mar) e relacionar com efeito observado quando o feixe de laser passa por um CD descascado, ou seja, pela rede de difração do disco.

Figura 27: Registro do momento de interação dialogada com alunos do CEAB.



Fonte: autores do trabalho

Figura 28: Atividade experimental realizada pelos estudantes



Fonte: autores do trabalho

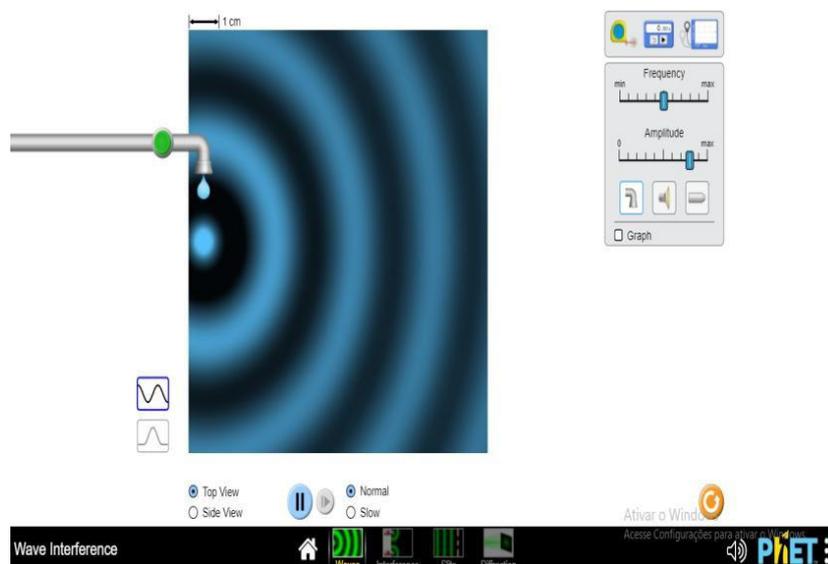
Além disso, foi solicitado aos estudantes que registrassem, por meio de vídeo, os experimentos realizados (ver figura 28), a fim de possibilitar mediações extraclasse e a ressignificação de alguns conceitos. Após realização dos experimentos, os alunos foram

submetidos a um mediador semiótico, mais precisamente o simulador virtual PHET Física que apresenta simulação de ondas num tanque com água, sendo possível discutir conceitos de amplitude, frequência e comprimento de onda.

Na etapa seguinte da aula, o professor provocou os estudantes com uma situação problema:

Qual padrão seria mostrado num anteparo do experimento da fenda dupla, caso fosse lançado um canhão de bolinhas de gude ?

Figura 29 – Captura de tela do simulador virtual PHET - Física - ondas no tanque



Fonte: autores do trabalho

Ao constatar as previsões, foram apresentados dois vídeos de curta duração (outro mediador semiótico), um mostrando o padrão corpuscular no anteparo ao realizar um experimento de dupla fenda com corpúsculo e outro destacando as franjas claras e escuras no anteparo ao realizar um experimento de dupla-fenda com laser no laboratório (*disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=WmW6nCjrGXI>*).

Note-se que, buscando confrontar a previsão da situação e o que ocorreu no experimento do vídeo, a ideia é agir na zona de desenvolvimento proximal do aprendiz, caracterizando e diferenciando o padrão ondulatório e corpuscular.

Convém dizer que a estratégia de apresentar os conceitos e fenômenos ondulatórios visa possibilitar o conhecimento deste quadro teórico, além do quadro corpuscular, intuitivo para os estudantes, uma vez que está associado a experiência prática cotidiana. Dessa forma, espera-se que os mesmos consigam, utleriormente, utilizando destes conhecimentos, analisar e descrever fenômenos quânticos, partindo do experimento de dupla fenda no regime

monofotônico, abrindo caminhos para o entendimento das características contraintuitivas da física quântica.

Aula 01

Objetivos:

Compreender alguns conceitos e leis fundamentais da Física clássica, mais especificamente o determinismo implícito na teoria newtoniana, evidenciado por Laplace, bem como o conceitos de interferência no regime clássico, presentes no experimento da fenda dupla que caracteriza a luz como um fenômeno, tipicamente, ondulatório.

Descrição da aula:

Apresentação da proposta da aula e esclarecimento dos objetivos. Em seguida, os alunos serão submetidos a um vídeo de curta duração do Prof. Luiz Davidovich, disponível em < <https://www.youtube.com/watch?v=C-XWpAFxHS4> > (tempo de 10s até 6:50min) , a fim de possibilitar o conhecimento de alguns conceitos e leis fundamentais da Física clássica, mais especificamente o determinismo implícito na teoria newtoniana, evidenciado por Laplace, bem como o conceitos de interferência no regime clássico, presentes no experimento da fenda dupla que caracteriza a luz como um fenômeno, tipicamente, ondulatório.

Vale salientar que serão enfatizadas as semelhanças da interferência construtiva e destrutiva nas ondas mecânicas (ondas no tanque de água) e eletromagnéticas (Experimento de young). Perceba que neste momento torna-se fundamental remeter o que está sendo discutido com o experimento realizado com laser e o CD e as observação feitas na praia durante as oficinas.

Esquema da aula 01

Etapa	Duração	Descrição
1	08 a 10 min	Apresentação da proposta e esclarecimento dos objetivos da aula
2	10 a 15min	Exposição do vídeo explicativo do prof. Luiz Davidovich
3	20 a 25min	Interação dialogada Professor -aluno e aluno-aluno

Aula 02

Objetivos: Perceber situações cotidianas e acessórios que utilizam do fenômeno da polarização da luz;

Analisar e realizar previsões sobre o comportamento da luz ao passar por dois filtros polarizadores em distintas configurações experimentais.

Descrição da aula:

Exposição dialogada com imagens cotidianas que possuem associação com o fenômeno da polarização da luz, o professor provocará os estudantes para que busquem uma explicação para cada imagem apresentada, observe as imagens abaixo:

Figura 30 – Imagens de acessórios e equipamentos relacionados com polarização da luz



Fonte: google imagens (Adaptada)

Durante a interação dialogada acerca das situações cotidianas, o professor abordará a polarização da luz, partindo da análise do ocúlos 3D, geralmente utilizado em cinemas. Em seguida, foi apresentado um trecho de um vídeo de curta duração que apresenta a polarização da luz numa direção ao passar por um filtro polarizador, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=AiAOFnVq0Yo> (tempo de 10:30min a 14:10min).

O professor colocará situações problemas envolvendo os filtros polarizadores e os alunos deverão prever o que acontecerá com a luz em cada situação descrita. Posteriormente, realizarão o experimento com os filtros polarizadores em distintas configurações experimentais e, caso ocorra distinções no resultado esperado e o obtido experimentalmente, elaborar uma explicação para o que possa ter ocorrido.

Figura 31 – Imagens de acessórios e equipamentos relacionados com polarização da luz



Fonte: Autores do trabalho

Figura 32 - imagem ilustrativa do experimento com filtros polarizadores formando ângulo 45° entre si



Fonte: Autores do trabalho

Figura 33 - imagem ilustrativa do experimento com filtros polarizadores formando ângulo 90° entre si



Fonte: Autores do trabalho

Situações-problema:

1. Como você espera que aconteça a visualização da frase na caixa:

1.1 Ao colocar dois polarizadores formando o ângulo de 0° entre eles, ou seja, paralelos;

1.2 Ao colocar dois polarizadores formando o ângulo de 45° entre eles;

1.3 Ao colocar dois polarizadores formando o ângulo de 90° entre eles, ou seja, perpendiculares;

2. Como você explica a visualização no vidro fumê de um carro?

Após a realização do experimento foi feita uma provocação por meio de duas questões:

1. Ao realizar o experimento, ocorreu o que você esperava? Caso não, o que pode ter acontecido?

2. Quais semelhanças e diferenças você consegue perceber em relação ao vidro fumê e o experimento realizado?

A proposta é o estudante interagir com o experimento e prevê o que acontece com as três situações experimentais distintas. Notadamente, a estratégia de previsão e confronto experimental visa agir na zona de desenvolvimento proximal do aprendiz para construção do conceito de polarização da luz.

Obs: A recomendação é que as aulas 01 e 02 sejam geminadas.

Esquema da aula 02

Etapa	Duração	Descrição
1	10 a 15 min	Apresentação de imagens de situações cotidianas e Interação dialogada Professor -aluno e aluno-aluno
2	05 a 10min	Apresentação das situações-problema e registro das previsões

3	05 a 10min	Realização do experimento com os dois filtros polarizadores a 0° , 45° e 90°
4	10 a 15min	Análise da situação experimental observada e registro escrito

Aula 03

Objetivos: Analisar o comportamento da luz no regime microscópico;

Compreender o conceito de fóton;

Descrever o comportamento dual do fóton, partindo do experimento da fenda dupla.

Descrição da aula:

Nesta aula, os estudantes foram submetidos a um mediador semiótico, mais especificamente um vídeo de curta duração disponível no Youtube que aborda a história acerca da natureza e comportamento da luz até chegar no conceito do fóton (link do vídeo https://www.youtube.com/watch?v=IyS8CTG6_Ws Tempo de 10s até 1:55min). Em seguida, o professor buscando agir na ZDP dos estudantes faz provocações por meio de questões cuja as respostas possuem caráter contraintuitivo, buscando perceber o que os alunos já sabem e/ou aprenderam sozinhos durante a exibição dos vídeos ou nas suas vivências anteriores (momento de obter indícios referente a zona de desenvolvimento real dos estudantes).

Questões Norteadoras

1- Se no experimento da fenda dupla, considerarmos um feixe de baixa intensidade, de tal forma que consiga emitir um fóton (partícula constituinte da luz) por vez. Apareceria o mesmo padrão de interferência ? Justifique sua resposta.

2- o que você consegue perceber de semelhanças e diferenças entre um fóton e uma bolinha de gude ?

3- Para você, se colocássemos um detector de fótons numa fenda, apareceria o padrão ondulatório de interferência com franjas claras e escuras ? Justifique.

4- Você acredita que um fóton pode ser dividido em dois? Justifique

Os estudantes foram orientados a registrar suas respostas numa folha de caderno e, posteriormente, socializar com o professor e os demais colegas, uma vez que não existe mediador universal, será fundamental a interação dialogada com o professor (parceiro mais capaz, de acordo com a teoria de Vygotsky) nesta aula.

Por fim, serão exibidos os minutos restantes do vídeo, explorando o experimento de dupla fenda no regime quântico. Dessa forma, mais uma vez, buscando agir na ZDP dos estudantes através da estratégia de confrontamento das respostas/previsões dos estudantes através da interação dialogada. Convém dizer que nesta aula fica evidente a relevância das

discussões realizadas nas oficinas para compreensão do quadro ondulatório e corpuscular, afim de ter uma maior entendimento e tomada de consciência sobre os fenômenos quânticos.

Obs: A recomendação é que as aulas 03 e 04 sejam geminadas.

Esquema da aula 03

Etapa	Duração	Descrição
1	02 a 05 min	Exposição do vídeo abordando a história acerca da natureza e comportamento da luz até chegar no conceito do fóton.
2	10 a 15min	Tempo dedicado para os alunos registrarem suas respostas das questões norteadoras.
3	08 a 10min	Interação dialogada aluno-aluno e aluno-professor.
4	05 a 07min	Exposição do vídeo explicativo sobre experimento dupla-fenda no regime quântico.
5	08 a 10min	Interação dialogada sobre comportamento da luz no regime monofotônico.

Aula 04

Objetivos: Compreender a interpretação da Complementaridade da MQ, partindo do Interferômetro de Mach Zehnder(IMZ);

Entender os conceitos fundamentais da MQ - Objeto quântico, superposição de estados quânticos, polarização de fóton.

Descrição da aula:

Primeiramente, buscando estabelecer um elo com as duas aulas anteriores, será exibido um vídeo de curta duração do Prof. Osvaldo Pessoa Jr. (disponível em https://www.youtube.com/watch?v=wSKvas_58Bo. Tempo de 20s a 7:00) abordando a interpretação da Complementaridade da MQ através da análise do comportamento e detecção do fóton no contexto experimental bem definido, partindo do Interferômetro de Mach-Zehnder. Evidentemente, será demonstrado o comportamento ondulatório e corpuscular no IMZ.

Vale salientar que a escolha deste vídeo faz-se necessário pela clareza na explicação e linguagem acessível, bem como pelo fato que utilizaremos simulador virtual do IMZ para discutir o emaranhamento no decorrer da SD.

Nesta aula, haverá, predominantemente, mediação social, ou seja, os sujeitos envolvidos no processo de ensino e aprendizagem, notadamente professor e alunos, deverão interagir mutuamente buscando construção do significado de alguns conceitos fundamentais da MQ para compreensão, posteriormente, do fenômeno do emaranhamento. Os conceitos de

objeto quântico, superposição de estados quânticos e polarização de fóton serão discutidos por meio de uma exposição dialogada utilizando recursos audiovisuais e imagens, oportunamente, será exposto imagens reais do emaranhamento de fótons e algumas aplicações no cotidiano, como nas telecomunicações.

Ao final da aula, os estudantes deverão elaborar um breve relato escrito, destacando o entendimento sobre a interpretação da complementaridade, polarização de fóton, objeto e superposição quântica. Em outras palavras, momento de obter indícios referente a zona de desenvolvimento real dos estudantes, isto é, aquilo que foi aprendido sozinho e/ou nas suas vivências anteriores. Ademais, será disponibilizado um material complementar no formato Ebook ilustrado com objetivo de proporcionar aos estudantes mediações extraclasse.

Esquema da aula 04

Etapa	Duração	Descrição
1	10 a 15 min	Exposição dialogada do vídeo do prof. Osvaldo Pessoa Jr sobre a interpretação da Complementaridade, partindo do IMZ
2	10 a 15min	Exposição dialogada utilizando TDIC"s, buscando esclarecer conceitos fundamentais para construção do significado do EQ
3	05 a 10min	Elaboração de um relato, evidenciando o que compreenderam da IC, conceito do fóton e experimento de dupla fenda clássico e quântico

Aula 05

Objetivos: Construir o significado do conceito do emaranhamento quântico;

Analisar o caráter contraintuitivo do EQ, a partir da interpretação da Complementaridade.

Descrição da aula:

Inicialmente, os alunos serão expostos a dois mediadores semióticos do novo conhecimento, em outras palavras, serão apresentados dois vídeos de curta duração que abordam a temática do emaranhamento quântico, sendo que um dos vídeos relaciona o experimento do fenômeno realizado num laboratório. Os vídeos estão disponíveis no Youtube e podem ser acessados por meio dos links <https://www.youtube.com/watch?v=CXrptgPviN8>; https://www.youtube.com/watch?v=P_Ll8QcfxYM.

Posteriormente, serão colocadas duas questões norteadoras afim de oportunizar uma discussão entre os estudantes. Momento de socializar o que entenderam e eventuais dúvidas, uma vez que as mediações semiótica e social são indissociáveis para o processo de

aprendizagem, como advoga Vygotsky. Logo, cada estudante será incentivado a externar seus questionamentos sobre o fenômeno físico do emaranhamento quântico.

Obs: A recomendação é que as aulas 05 e 06 sejam geminadas.

Esquema da aula 05

Etapa	Duração	Descrição
1	08 a 10 min	Exposição dialogada de vídeos de curta duração que abordam a temática do emaranhamento
2	15 a 20min	momento de socialização entre os pares: aluno- aluno utilizando o recurso auxiliar no formato ebook
3	10 a 15min	Interação dialogada Professor -aluno e aluno-aluno

Aula 06

Objetivos: Construir o significado do conceito do emaranhamento quântico;

Reconhecer as características dos fótons emaranhados polarizados;

Determinar a probabilidade de detecção dos fótons emaranhados polarizados.

Descrição da aula:

Apresentação do simulador virtual - Oscilador Paramétrico Óptico Virtual (OPOV), evidenciando seus principais componentes, isto é, fonte de Laser, Cristal não-linear, filtros polaróides, fotodetectores, bem como as opções para ajustes. Posteriormente, será solicitado aos estudantes que sugiram possíveis configurações dos filtros polaróides:

1. Para que ocorra detecção dos fótons emaranhados nos respectivos detectores;
2. Para que não ocorra detecção dos fótons emaranhados nos respectivos detectores;
3. Justificar, com suas palavras, a estratégia utilizada para resolução do problema proposto.

Após as respostas das predições, o professor rodará o simulador, fazendo o confronto entre a previsão aportada nos conhecimentos anteriores (consolidado na zona de desenvolvimento real) e o que está sendo visualizado no simulador virtual, obviamente, agindo na ZDP dos alunos. Espera-se que os alunos possam, com a ajuda do professor, reconhecer as características dos fótons emaranhados polarizados.

Ao final da aula, o professor fará a demonstração das probabilidades de detecção dos fótons emaranhados relacionado com a função $1/2(\cos^2 \theta)$; Onde θ é o ângulo formado entre os filtros polarizadores. Os estudantes serão incentivados a calcular a probabilidade de detecção dos fótons emaranhados referente a configuração sugerida pelos mesmos. Em seguida, haverá comparação da probabilidade calculada e o valor previsto pelo OPOV (ver

figura 14). Logo, há uma ação na zona de desenvolvimento proximal, e espera-se que os alunos possam, com a ajuda do professor, determinar a probabilidade de detecção dos fótons emaranhados polarizados.

Esquema da aula 06

Etapa	Duração	Descrição
1	08 a 10 min	Apresentação do Simulador Virtual
2	10 a 15min	Os alunos deverão sugerir as possíveis configurações para detecção e não-deteção dos fótons - Realização do Experimento virtual
3	08 a 10 min	Registro do que foi observado através do experimento virtual e sua predição.
4	05 min	O professor orientará o cálculo das probabilidades de detecção e não detecção
5	08 a 10 min	Determinação da probabilidade de detecção dos fótons emaranhados polarizados referente a respectiva configuração experimental

4.2 RELATO DE EXPERIÊNCIA - ANÁLISE SOBRE APLICAÇÃO DA SD

Nessa subseção serão detalhados os dados obtidos através da aplicação da SD, durante o ano letivo 2022, com alunos da 3ª Série do EM ingressos numa unidade escolar da rede estadual da Bahia, mais precisamente Colégio Estadual Antônio Balbino, localizado no município de Madre de Deus, região metropolitana de Salvador - BA. Além disso, será realizado uma análise baseando-se no referencial teórico do trabalho, Lev Vygotsky, buscando mapear as zonas de desenvolvimento real e desenvolvimento potencial dos participantes da pesquisa, a fim de perceber indícios da internalização de conceitos da ondulatória: difração, interferência, polarização da luz; da MQ: Estado quântico, superposição quântica, fóton, polarização do fóton e o emaranhamento quântico, nosso foco principal neste trabalho.

Esta pesquisa contou com a participação de 37 estudantes, sendo que destes apenas 25 participaram de todas as aulas previstas. Na transcrição das respostas, foi privilegiado as respostas que apresentam elementos distintos, a fim de evitar uma leitura exaustiva e improdutiva do texto. Vale ressaltar que a SD prevê uma avaliação, predominantemente, qualitativa, apesar de contemplar aspectos quantitativos referente a determinação probabilística das detecções dos fótons polarizados emaranhados inerente a teoria quântica.

Espera-se através da aplicação da SD obter elementos da aprendizagem teórica-epistemológica dos estudantes sobre um fenômeno da MQ, mais especificamente o emaranhamento quântico. Convém dizer que para compreensão do EQ faz-se necessário acompanhar o processo de construção e/ou ressignificação de conceitos através das mediações social e semiótica, NETTO et al (2019), reforçam

A importância do seu estudo [emaranhamento quântico] recai não apenas nas suas aplicações tecnológicas, mas sobretudo nas possibilidades que oferece para compreensão do desenvolvimento da teoria quântica, seja em relação aos seus fundamentos ou aos pressupostos filosóficos e epistemológicos e suas implicações. Esses são aspectos fundamentais quando se defende um ensino de Física que proporcione uma imagem de ciência como processo em construção por seres humanos e com um caráter altamente interdisciplinar.

Diante desse contexto, buscando enfatizar o processo de construção do conceito do EQ, as aulas desta SD foram pensadas considerando o viés epistemológico da Complementaridade da MQ que pressupõe o conhecimento de elementos da MC para comunicar os resultados experimentais no contexto da MQ. Porém,

não deve ser confundido com a adequação de serem feitas analogias entre a estrutura teórica da MC com a da MQ, visando compreender a fenomenologia quântica, uma vez que, de um ponto de vista ontológico, não mais se poderá falar de uma realidade dada, independentemente do observador, por uma questão de princípio intrínseco da teoria quântica. (NETTO, 2016)

Para tanto, a fim de tornar as discussões anteriores factível numa sala de aula, faremos um relato de experiência. Inicialmente, durante as duas primeiras aulas de aplicação da SD, como detalhado na seção 4.1, foi solicitado aos estudantes que realizassem uma atividade experimental com polarizadores numa perspectiva prospectiva, baseando-se na previsão, realização experimental e análise das previsão após experiência prática. Convém dizer que o intuito desta atividade é possibilitar aos estudantes o desenvolvimento da percepção de situações cotidianas e acessórios que utilizam do fenômeno da polarização da luz, além de analisar e realizar previsões sobre o comportamento da luz ao passar por dois filtros polarizadores em distintas configurações experimentais.

Na tabela 2, podemos observar as respostas de alguns estudantes, quando perguntados sobre o que esperavam acontecer ao configurar os filtros polaróides em determinadas posições:

1. Como você espera que aconteça a visualização da frase na caixa:

1.1 Ao colocar dois polarizadores formando o ângulo de 0° entre eles, ou seja, paralelos;

1.2 Ao colocar dois polarizadores formando o ângulo de 45° entre eles;

1.3 Ao colocar dois polarizadores formando o angulo de 90° entre eles, ou seja, perpendiculares;

2. Como você explica a visualização através do vidro fumê de um carro?

Tabela 2. Respostas dos alunos durante atividade experimental com filtros polarizadores

Aluno	Previsão da situação experimental com polarizadores	Análise após realização do experimento com polarizadores
(a)		
YS	1.1 A luz não passará, pois está na mesma direção, deixando mais escura 1.2 A luz passará, deixando mais clara 1.3 Não passará luz, deixando escuro 2. O filme fumê do carro tem duas percepções, quem está dentro do carro pode visualizar a parte de fora, mas não acontece o mesmo com quem está na parte de fora, pois não passará luz	1. Sim, o experimento foi escurecendo com aumento do grau do polarizador 2. Não. porque acontece de forma diferente do que eu pensava, com o aumento do grau vai ficando mais escuro sem passagem da luz
Y	1.1 Provavelmente, irá ocorrer uma reflexão que causará interrupção e não deixará ver o outro lado. 1.2 Quando a luz da lâmpada chegar perto da outra luz, provavelmente, a iluminação ficará mais fraca ou não terá iluminação, nesse caso, a luz passará perto do objeto que está iluminando. 1.3 A luz não irá passar por ocorrer uma reflexão que causará uma interferência 2. Ocorre um ângulo de 90° entre os 2 vidros que causará uma interferência com a luz que irá deixar mais escuro	1. Não. Porque eu achava que não daria para ver nada e está extremamente borrado. 2. Não, porque eu achava que seria somente uma reflexão sem depender do ângulo.
MA	1.1 Acho que a luz será refletida mais fraca; 1.2 Haverá luz só que um pouco fraco; 1.3 Eu acho conseguirei ver a luz do outro lado, só que mais fraca. 2. Para mim, o vidro fica daquela forma pelo plástico que é colocado no vidro e de uma forma ou outra ajuda, para não vê quem está dentro	1. Sim, o ângulo de 90° haverá um pouco de luz, bem fraca. 2. Mais ou menos, só acabei percebendo que o vidro fumê tem mais ou menos 90° entre eles.
MS	1.1 A imagem continua normal e não sofre nenhuma alteração, somente um pouco da diminuição da claridade. 1.2 Altura da imagem deixando ela meio desfocado. 1.3 A imagem começa a se formar em dimensões e desfocada 2. O uso do filme fumê invalida a visão externa do veículo e a diminuição da claridade.	1. Sim, com que a imagem iria se alterar de acordo com o grau. 2. Sim, pois, cada vez, que alterávamos o polarizador a imagem ficava mais escura e inviabilizando ainda mais a claridade.
LB	1.1 Visualizará normalmente por está a 0° 1.2 Ficará um pouco escuro e dificultaria a visualização 1.3 Ficará totalmente escuro 2. O vidro fica escuro, dependendo da porcentagem do	1. Ocorreu sim. 2. Mantenho, confirmou completamente, pois cada vez que a porcentagem do

	fumê, ficará totalmente escuro, sem poder enxergar dentro quem está do lado de fora	fumê aumenta, vai ficando cada vez mais escuro e difícil de enxergar.
B	<p>1. Ver a imagem dependendo dos ângulos. Então, não mudaria em nada, porque a cada ângulo as imagens ficarão claras e escuras</p> <p>1.1 A luz seria normal</p> <p>1.2 A visualização fica com a metade da visualização, luz fica um pouco turva</p> <p>1.3 Se colocar o ângulo de 90° entre si, as imagens serão com mesma clareza.</p> <p>2. Assim, o filme fumê impede da luz entrar no carro e quem está no carro a imagem e com mais clareza</p>	<p>1. Ao ver o experimento, descobri que no ângulo de 90° a luz das imagens é com menos clareza. Então, esperava que neste ângulo a luz passasse com mais clareza.</p> <p>2. Sim, o vidro fumê chega o ângulo de 90°, então depende da horizontal ou vertical as imagens podem ser vistas mais claras ou escuras, sendo determinado os polarizadores.</p>
C	<p>1. A luz vai ser emitida em todas as direções.</p> <p>1.1 Vai visualizar tudo normalmente</p> <p>1.2 Ele ainda vai enxergar, mas com uma escuridão</p> <p>1.3 Vai ficar tudo escuro</p> <p>2. A pessoa que está dentro do carro consegue ver tudo e quem está fora não consegue enxergar nada</p>	<p>1. No ângulo de 0° e a medida que vai aumentando vai escurecendo .</p> <p>2. Sim.</p>
CA	<p>1.1 A diminuição da luz, deixando ela fraca. Logo, não irá bloquear a luz.</p> <p>1.2 Haverá brechas na luz</p> <p>1.3 Não terá brechas de luz, ficará mais escura</p> <p>2. O filme acaba bloqueando os pontos de luz, deixando o carro mais escuro.</p>	<p>1. Sim</p> <p>2. Sim, com a mudança de ângulo o polarizador bloqueia mais luz, deixando mais escuro.</p>
LM	<p>1.1 Como o polarizador elimina os reflexos e deixa a imagem limpa, ao colocar dois de forma paralela, não haverá muita alteração.</p> <p>1.2 Imagino que parte da luz fique exposta, fazendo com que fique um pouco mais escuro que o normal</p> <p>1.3 Ao colocar os dois, imagino que esse passe toda luz.</p> <p>2. No filme fumê, podemos ver que somente parte da luz atravessa, eliminando os reflexos.</p>	<p>1. Sim, a maioria, só no ângulo de 90° que cessou grande parte da luz, mas não totalmente.</p> <p>2. Sim, eu vi o polarizador no ângulo de 90° ficou com imagem mais escura, como fica no filme fumê.</p>
ME	<p>1.1 Espero uma visualização normal</p> <p>1.2 Uma visualização média, com menos luz, ou seja, mais escura.</p> <p>1.3 Uma diminuição alta da visualização.</p> <p>2. A não passagem da luz, assim, impossibilitando a visualização do lado contrário</p>	<p>1. Sim.</p> <p>2. Minha explicação bate mais ou menos, pois o fumê não há visualização, apenas de um ângulo</p>
MC	<p>1,1 Acredito que o item do experimento irá filtrar ou polarizar a luz dentro da caixa. Assim, a luz não passará</p>	<p>1. Aconteceu algumas coisas que eu já</p>

- ao colocar os dois polarizadores paralelos.
- 1.2 Vai passar a luz filtrada apenas no ângulo dos polarizadores
- 1.3 A luz ainda é visível, porém mais fraca por conta do polarizador
2. Acredito que o fumê é um polarizador que a luz de fora do carro reflete com menor potência. Ou seja, filtrada para quem está dentro, podendo visualizar, mas como dentro do carro não tem luz para refletir, do lado de fora fica escuro.
- AL
- 1.1 Espero enxergar algo que não seja possível a olho nú. Imagino, que se colocar em 0° fica a visualização a mesma caixa.
- 1.2 A visualização vai mudar e as lentes vão ficar um pouco mais escura.
- 1.3 Em 90° , as lentes vão ficar mais escuras.
2. Eu acho que tem a polarização no vidro fumê, fazendo com que o vidro tenha um grau de polarização em que fica escura;
- J
- 1.1 Eu, espero que quando olharmos dentro do polarizador e alternado, conseqüentemente a gente não consiga visualizar. Logo, enxergaremos normal.
- 1.2 Acho que ainda conseguimos enxergar, as que mais escura
- 1.3 Enxergaremos escuro
2. Quem está dentro consegue ver quem está fora, quem tá fora não enxerga, porém depende muito do grau do fumê.
- M
- 1.1 Espero conseguir visualizar através do polarizador o que não veria sem ele. Logo, acredito que conseguiríamos ver normal
- 1.2 A visão ficaria mais escura, conforme aumento do grau.
- 1.3 Não conseguiríamos enxergar nada, estaria escuro
2. Depende do grau do fumê, quanto maior, mais escuro será;
- NY
- 1.1 Acredito que ao colocar os dois polarizadores em 0° , nós teremos uma visualização muito complexa, acho que seria como enxergamos no dia a dia, diminui sua intensidade.
- imaginava, quanto mais você aumenta o ângulo, vai ficando mais escuro, aos 90° fica bastante, mas ainda é possível enxergar.
2. Acredito que sim, pois a luz que é refletida é filtrada pelo polarizador, deixando escuro, quanto maior o ângulo dos polarizadores, mais difícil de ver fica.
1. Eu pensava que a minha visualização pelo polarizador iria ficar toda escura, mas na verdade vai alternando do mais claro até o mais escuro, de acordo com o grau.
2. Não. Eu achava que o vidro fumê era algum tipo de plástico e com o experimento eu entendi que é um polarizador que, de acordo com o grau vai diminuindo a potência da luz.
1. Sim, quando coloquei o polarizadores em 45° , aconteceu o que eu esperava, ou seja, ainda conseguimos enxergar.
2. Sim, principalmente, quando digo que depende do grau do fumê.
1. Sim, no 45° ainda conseguimos enxergar, mesmo estando um pouco mais escuro. E como esperado no 90° não enxergamos nada.
2. Sim, quanto maior [o grau], mais escuro fica.
1. Não exatamente, eu esperava que ao aumentar o ângulo, ficasse um pouco melhor a

- | | |
|--|--|
| 1.2 A visualização da luz será um pouco melhor, mas ainda assim, não acho que mudará muita coisa.
1.3 Colocando os dois polarizadores em um ângulo de 90° , um na vertical e outro na horizontal, a luz será passada com mais intensidade, deixar ela passar com mais detalhes que não teria sido percebido tão facilmente no dia a dia.
2. Acredito que o filme funciona da seguinte forma: como o filme é preto, a luz é refletida e absorvida, Então, quem está do lado de fora do carro não consegue ver a parte de dentro. Mas, quem está dentro consegue ver. | visualização, quando coloca 0° é mais claro e visível, no 45° a visão fica um pouco mais difícil de ver e no ângulo de 90° , a visualização é bem mais escura ficando em um preto azulado como seria numa sessão de raio X.
2. Sim, o experimento confirmou uma parte na qual estava com dúvida. |
| D 1.1 Essa imagem deve chegar de uma forma diferente, com a forma de ver alterada. Então, continua a imagem normal.
1.2 Altera a imagem do quadro, fica meio desfocada
1.3 A imagem começa a se formar em 3 dimensões.
2. O uso do fumê invalida a visão interna do veículo; | 1. Que imagem iria deformar ou algo do tipo, começa a alterar.
2. Sim, foi o que justamente aconteceu no polarizador, a imagem ficou, cada vez mais, escura; |

Ao analisar as respostas dos alunos nesse primeiro momento, podemos dividir em três categorias a) Estudantes que não conseguiram sustentar sua previsão inicial após a realização experimental; b) Estudantes que conseguiram sustentar sua previsão inicial com algumas ressalvas; c) Estudantes que conseguiram sustentar sua previsão inicial sem ressalvas. Contudo, independente da categoria que incluímos os estudantes é possível perceber indícios da ação na ZDP por meio das respostas.

A) Estudantes que não conseguiram sustentar sua previsão inicial após a realização experimental

Pôde-se perceber que a realização do experimento possibilitou uma ação na ZDP de alguns estudantes, como evidenciado nas respostas dos (as) alunos(as) Y, B, LM, MC, AL, NY. Uma vez que a observação do experimento não foi justificada pela previsão inicial, houve a necessidade de repensar, ressignificar o ocorrido para melhor explicar a situação fenomológica, conforme previsto na teoria Vygotskiana.

B) Estudantes que conseguiram sustentar sua previsão inicial com algumas ressalvas

Ao analisar as respostas dos estudantes que, de alguma forma, esperavam que ocorresse mudanças na visualização ao configurar os polaróides com ângulos diferentes, foi possível perceber que houve uma extrapolação do que foi observado na situação experimental,

inclusive, relacionando com o vidro fumê do carro, como evidenciado nas respostas dos(as) alunos(as) YS, MA, LB, CA, LM, ME, D.

Note-se que a previsão está associada a um modelo teórico consolidado na zona de desenvolvimento real do aluno, contudo, ao estabelecer as mediações social e semiótica (através da interação aluno-experimento), e o aluno consegue associar com situações cotidianas há uma ação na ZDP dos estudantes.

C) Estudantes que conseguiram sustentar sua previsão inicial sem ressalvas.

Pôde-se perceber que a realização do experimento possibilitou a alguns estudantes uma ideia mais consolidada e simplista da situação fenomenológica observada, ou seja, os estudantes incluídos nesta categoria buscavam descrever a situação observada afim de justificar sua previsão, como destacado nas respostas dos(as) Alunos(as) MS, C, J e M.

Vale ressaltar que analisando as respostas, a maioria concluiu que a medida que aumenta o ângulo entre os filtros polarizadores fica mais difícil a visualização através dos filtros. Mas, essa resposta pode revelar uma ideia equivocada acerca da polarização da luz, uma vez, que seguindo esta ideia, o ângulo de 120° (não possível de ser realizado, pois no experimento o limite era 90°) implicaria numa dificuldade ainda maior de visualização.

Contudo, foi necessário a intervenção do professor, parceiro mais capaz, de acordo com a teoria de Vygotsky, que demonstrou por meio de uma simulação virtual o que ocorria com a passagem da luz quando o ângulo entre os filtros fosse de 120° . Em seguida, reforçou o significado dos polarizadores formarem entre si ângulo de 0° está associado ao fato de ambos polarizadores possuírem a mesma direção de transmissão. De forma análoga, o ângulo de 90° pressupõe que ambos estão perpendiculares entre si.

Nas duas aulas seguintes (aulas 03 e 04), o professor estabeleceu uma estratégia didática afim de proporcionar aos estudantes uma análise mais detalhada do comportamento da luz, porém, diferente da aula anterior, a ênfase agora é no regime microscópico. Em outras palavras, se reduzirmos a intensidade do feixe de luz, de tal forma que consigamos emitir um fóton por vez, o comportamento no regime monofotônico apresenta características contraintuitivas do senso comum. Para tanto, faz-se necessário compreender o conceito do fóton no decorrer da história até chegar no conceito previsto no âmbito da óptica quântica, área de interesse para entendimento do emaranhamento quântico.

Por outro lado, o experimento de dupla fenda realizado por Young, quando redimensionado para o regime monofotônico permite o melhor entendimento dos objetos quânticos e seus aspectos peculiares. Dessa forma, espera-se que os estudantes consigam ao

final da aula, com ajuda do professor, descrever o comportamento dual do fóton num contexto experimental bem definido. Vale ressaltar que está implícito o referencial epistemológico adotado da Complementaridade de Niels Bohr.

Sendo assim, proporcionar o entendimento do quadro epistemológico para os estudantes por meio do IMZ estimulou as discussões acerca dos conceitos fundamentais da MQ, mais precisamente: objeto quântico, superposição de estados quânticos e polarização de fóton, como estão explícitos nas respostas dos estudantes:

Aluna ME

Um objeto de massa segue o percurso da fenda, diferentemente das ondas, que ao passar por uma fenda aumenta a velocidade da onda, porém se for adicionado duas fendas, as ondas se cruzam fazendo com que as ondas diminua sua potência.

O fóton é uma partícula de luz, ele modifica seu comportamento a depender se houver presença do sensor, podendo está em forma de partículas ou em ondas.

Aluno D

O fóton são partículas minúsculas que ao ser lançada em uma fenda de duas aberturas produz o mesmo efeito das ondas nessas duas fendas. Entretanto, ao lançar a gude em seu tamanho normal, é possível obter o formato na parede, independente de ter uma ou duas aberturas. Pesquisadores, investigaram o motivo de acontecer esses eventos e para isso foi usado sensores, que ao observarem os experimentos interferiram de forma que as gudes microscópicas voltaram como se tivessem tamanho normal.

Aluna B

Eu entendi que os elétrons ou passavam por uma fenda ou por outra e formaram um padrão de partículas. Quando as bolas passam pelas fendas as partículas são emitidas em direção de uma barreira.

A bola quando passava pela dupla fenda e chegava nas barreiras formava várias paredes de partículas.

Luz é identificado na parte construtiva e na parte destrutiva ela se anula.

Aluna MS

os fótons são partículas que compõem a luz, não possuem massa e transportam energia.

Com o experimento de dupla-fenda as partículas são emitidas na direção de uma barreira onde tem duas fendas e no vídeo tinha um sensor captando a chegada das partículas que passam pelas fendas.

A experiência com as duas fendas na água consistem que as ondas ao passar pelas fendas, passa com maior intensidade e com isso, acontece um modelo de interferência ondulatório. Já, com as massas que pareciam com uma bola de gude, não acontecia o mesmo com a luz e a água, pois quando eu tenho coisas com massa, eu tenho [modelo] corpuscular (associado a massa). Então, sendo de tamanho normal ela formará o desenho que estão nas fendas e se forem de tamanhos microscópicos ele formará a mesma coisa que a da luz.

Aluno AL

No primeiro vídeo, a gente aprendeu sobre comportamento corpuscular e ondulatório. Quando as partículas de luz passam pela fenda, elas se mostravam no anteparo no formato da fenda, mas quando estão em formato de ondas e um topo da onda se choca com o topo da outra, elas acabam se anulando e fazendo várias fendas de luz ao invés de imitar a quantidade de fenda que tinha disponível

No segundo vídeo, fala sobre o interferômetro de Mach-Zender, que explica sobre interferência construtiva e interferência destrutiva. No experimento, são colocados 2 espelhos, um reflete 50% e o outro reflete totalmente. Quando esses reflexos tem suas ondas na mesma sintonia chama-se de interferência construtiva, mas quando essas ondas tem formas diferentes chama-se de forma destrutiva.

Aluno YP

[fótons] Partículas elementares que compõem a luz, eles não possuem massa, mas transferem energia.

Que se [refere] comportamento corpuscular é um objeto com massa e o movimento ondulatório é associado a onda.

[Experimento de dupla-fenda com fótons] partículas são emitidas na direção de uma barreira, onde foi feita uma dupla fenda atrás desta barreira há um detector, captando a chegada de cada partícula que passa pelas fendas.

Aluno VH

Bom, os fótons eles agem como ondas e sofrem interferência, os fótons se comportam como partículas...

Aluna YE

O estudo consiste em vários experimentos a começar pelo experimento da fenda dupla que é o comportamento corpuscular, quando temos objetos com massa, e o ondulatório, o movimento com ondas.

Quando lançamos objetos por uma fenda, eles formarão uma linha reta, porém o mesmo aconteceria com duas fendas, formaria duas linhas. No caso das ondas, quando utilizamos apenas uma fenda, forma só um movimento.”

Já na utilização de duas fendas as ondas se interferem e formam diferentes ondas com as forças distribuídas, não como no primeiro experimento que atinge apenas um ponto com maior potência.

Aluna M

Ao analisar os vídeos, pude perceber que no experimento quando as bolas de gude passam por uma fenda na vertical, forma no anteparo uma fenda na vertical, E, quando as bolas passam por uma fenda dupla transmite no anteparo uma fenda dupla. Quando e com ondas, quando passa por uma fenda possuem mais intensidade, e quando passa ou uma fenda dupla, uma interfere na outra.

Com as partículas, quando passam por uma fenda refletem [projetam] no anteparo uma linha vertical, e quando passam por uma dupla fenda transmitem no anteparo o mesmo formato que as ondas. O comportamento das partículas tem a interferência do experimento agem como partículas ou ondas.”

Aluno Y

“Os fótons são partículas que compõem a luz. Com o experimento de dupla-fenda ocorre o comportamento ondulatório, pois é concentrado em uma onda, dependendo do experimento ele pode ser uma onda ou partícula.”

“No experimento da dupla-fenda são emitidas na direção de uma parede, e, um sensor captando quando cada partícula chega na parede.

Aluna J

O fóton, como vimos na aula, são partículas de luz. No experimento, a pessoa colocou um feixe de luz que bateu na placa de metal. Mesmo saltando uma partícula por vez ainda era constatado uma interferência ondulatória.

Quando há duas fendas e a onda passa, elas se encontram fazendo com que elas se anulem, gerando interferência destrutiva.

Soubemos, depois da aula que o resultado ele pode se comportar como onda ou corpuscular, isso dependerá do experimento feito. Quando o professor passou o experimento mental do gato de Schrodinger, concluímos que não podemos afirmar nada, sobre nada”.

Aluna C

...Um comportamento corpuscular quando eu tenho um objeto que contém massa e ondulatório que está associado a onda.

A bolinha de gude e como um elétron, então, quando for arremessado pela fenda, ela ficará em linha reta. Já, a onda, os dois pontos se encontram e tem a interferência.

Aluno YP, VH, C, MA

Aluna MA

Pelo que eu pude entender sobre dupla-fenda é que quando a água passa pelas duas fendas tem varias fachas de luz, mas quando uma matéria passa pela fenda tem somente duas fachas de luz...

Aluna NY

Ao lançar duas fendas e lançar matéria temos duas linhas idênticas, mas ao realizar o experimento com ondas criou-se uma espécie de interferência entre elas formando mais ondas com uma interferência entre elas.

Ao lançar elétrons em uma fenda dupla também acontece o padrão de ondas..."

No experimento de Mach-Zehnder, o interferômetro feito com a luz de um laser e com dois poliametros [polarizadores] - não lembro o nome ao deixar todos os dois no mesmo ângulo a luz foi passada normalmente entre eles, mas ao mexer em um deles, alterando seu ângulo a luz parou de ser "refletida/passada", pois um deles estava mais escuro, então a luz foi apenas absorvida.

Aluna A

Se lançar um objeto por uma fenda conseguimos vê-lo na parede de trás.

Comportamento corpuscular quando objeto com massa se movimentando.

Ondulatório – ondas

Fóton são partículas que compõem a luz, se lançar um objeto por 1 fenda, conseguimos ver ele na parede de trás. Se colocar 2 fendas, veremos o objeto atrás em dobro de fendas na parede

Os fótons pode funcionar de duas formas se tiver interferência: pode ter um comportamento corpuscular ou ondulatória. No caso da ondulatória pode acontecer interferência construtiva e destrutiva - Construtiva - uma reforça a outra e elas se tornam maior - luz intensa. Destrutiva - elas se destroem- não tem luz.

Aluna LY

As ondas que batiam nas fendas e batia na parede de trás com maior intensidade. Já, com a segunda fenda, as ondas se encontram e chegam até a parede com a mesma intensidade.

“Um comportamento corpuscular quando eu tinha um objeto que contém massa. Ondulatório que está associado a onda.”

“ A bolinha de gude é como um elétron, então, quando ela for arremessada pela fenda ela ficará em linha reta já a onda os dois pontos se encontram e tem interferência.”

Aluna MC

Quando o objeto tem massa o movimento é corpuscular e quando é uma onda é ondulatório. No vídeo, acontece um experimento que nos deixa intrigado por conta de uma estranha interferência de um sensor no experimento [surgindo] a dúvida que o vídeo deixa é se a luz é onda ou é partícula. No experimento, ele vai mudando de formato, e é aí que está a resposta : Ele vai se comportar de acordo com o experimento, então podemos imaginar que ele pode ser comportar como corpuscular e ondulatório. Podendo ser “ os dois”. Finalizando com o experimento do gato de Schrodinger que deixa a ideia que não podemos opinar antes de abrir a “caixa”.

Aluna LF

Um comportamento corpuscular quando se tem um objeto que contém massa (gude). Ondulatório está associado a ondas”.

A bolinha de gude é como um elétron, então, quando ela for arremessada pela fenda ela ficará em linha reta na parede de trás, já a onda os dois pontos se encontram e se anulam...

Para haver a interferência depende muito do experimento, pois, se tiver um sensor ele pode interferir no experimento e acabar modificando”

Ao analisar as respostas dos alunos neste momento da SD, podemos inferir que baseado nos vídeos assistidos e nas discussões realizadas em sala, os estudantes apresentaram noções referente ao conceito do fóton e realizaram uma análise do experimento da fenda dupla no regime monofotônico. Além disso, revelaram ideias referente ao interferômetro de Mach-Zehnder e a interpretação da complementaridade na detecção do fóton, pormenorizadamente, o quadro corpuscular e ondulatório.

Vale salientar que após serem provocados pelo professor com questões cuja as respostas possuem caráter contraintuitivo, descritas na seção 5.1. O objetivo desta estratégia é buscar perceber indícios dos conhecimentos que os alunos já sabem e/ou aprenderam sozinhos

durante a exibição dos vídeos ou nas suas vivências anteriores (momento de obter indícios referente a zona de desenvolvimento real dos estudantes)

Alguns estudantes buscaram explicações lógicas relacionando com o conceito do fóton exposto no vídeo, ou seja, as noções do conceito físico estava associado a ideia de partícula clássica, como evidenciado nas respostas dos alunos(as) ME, D, B, AL, M, Y, J, LY. No entanto, foi perceptível que os alunos (as) MS e YP descreveram respostas mais próximas das aceitas pela comunidade científica no seio da MQ, isto é associaram o transporte de energia e inexistência de massa ao fóton.

Diante desse contexto, a fim de melhor estruturar nossa análise, dividimos as respostas do estudantes em dois grupos: Análise do experimento da fenda dupla no regime monofotônico e interpretação da complementaridade no IMZ, por conseguinte se desdobram em subgrupos: Análise do experimento da fenda dupla no regime monofotônico; Respostas com base em noções contraintuitivas do senso comum

I. Análise do experimento da fenda dupla no regime monofotônico

I.1 Respostas com base no viés clássico

Alguns estudantes buscaram explicações lógicas relacionando com o experimento de dupla fenda exposto no vídeo, ou seja, as noções do conceito físico estava associado a ideia de partícula clássica. Contudo, ao observar o padrão de interferência no anteparo fez com que repensassem a ideia que estava consolidada, evidentemente, nesta situação podemos perceber indícios da ação na ZDP dos estudantes, como evidenciado nas respostas dos alunos ME, D, B, AL, M, Y, J, LY

I.2 Respostas com base em noções contraintuitivas do senso comum

Pode-se destacar as respostas que revelam uma concepção dual para o fóton num contexto experimental bem definido. Contudo, há uma dúvida sobre o que realmente estava acontecendo e fazendo modificar os resultados experimentais, tais respostas podem ser observadas nas respostas dos alunos (as) MS, YE, NY, A, MC.

Convém dizer que houveram respostas com ênfase na descrição do experimento da fenda dupla, sem preocupação com o entendimento e extrapolação do fenômeno físico que ocorrera na situação descrita, estas análises podem ser vistas nas respostas dos alunos (as) MS, YE, NY, A, MC e LF.

II. Análise de conceitos fundamentais da MQ no IMZ

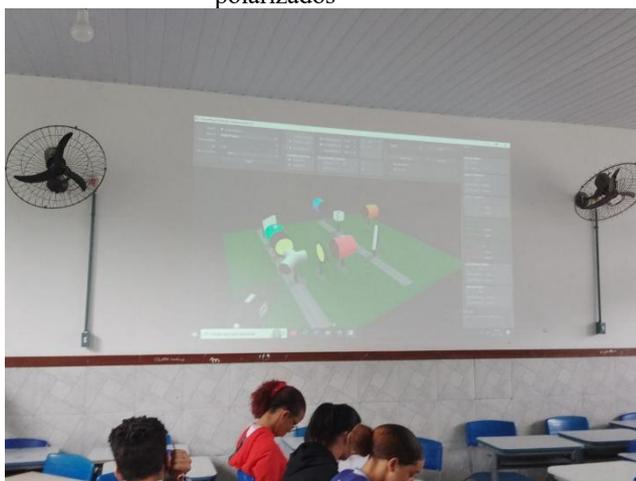
Nesta subseção serão especificados as respostas dos estudantes associando com os conceitos fundamentais da MQ, discutidos através do IMZ, sendo eles: objeto quântico, superposição quântica e polarização do fóton. A necessidade da interferência construtiva ou

destrutiva para detecção do fóton foi bem descrito pela Aluna AL. Já, as alunas J e MC, relacionam a superposição quântica, a exemplo do gato de schrodinger, com a impossibilidade de se afirmar algo antes da detecção, isto é a realização da medida. Se observamos a resposta da NY, podemos observar a análise da polarização do fóton polarizado no IMZ associando com a reflexão e absorção do mesmo.

Por fim, é notório os processos de (re)construções de significados devido as exposições dos vídeos (mediador semiótico) e as falas do professor, como previsto na teoria de mediação social de Vygotsky (1998).

Já nas duas últimas aulas desta SD (aulas 05 e 06), Como descrito no início dessa seção, buscou-se construir o significado do conceito do emaranhamento quântico, inclusive, analisando o caráter contraintuitivo, a partir da interpretação da Complementaridade. Além de determinar a probabilidade de detecção dos fótons emaranhados polarizados.

Figura 34 - imagem ilustrativa da aplicação do IVMZ, simulando situação de emaranhamento de fótons polarizados



Fonte: Autores do trabalho

Para tanto, um dos instrumentos utilizados para avaliação da aprendizagem dos alunos foi o uso do simulador computacional IVMZ, acompanhado de questões norteadoras. Obviamente, no início da aula foram apresentados os elementos constituintes da simulação do emaranhamento quântico. Note-se que a realização destas etapas foram fundamentais para desenvolver e perceber competências e habilidades relacionadas a formulação de hipóteses, modelos e teorias, bem como proporcionar os alunos como sujeitos ativos no processo de ensino e aprendizagem (BRASIL, 2018).

Para realização do experimento virtual no IVMZ foi proposto aos alunos que sugerissem duas possíveis configurações experimentais para os filtros polarizadores, sendo que uma deveria ocorrer detecção e outra não deveria ocorrer detecção dos fótons polarizados

emaranhados. Em seguida, a simulação foi rodada, e os mesmos deveriam analisar suas predições.

Tabela 3. Respostas dos alunos antes e após a realização da simulação no IVMZ

Aluno(a)	Sugestão de configuração experimental para detecção dos fótons emaranhados	Análise após realização do experimento virtual com IVMZ
MS	Minha hipótese é que os ângulos estão iguais em forma vertical [Logo,] dão o mesmo resultado em feixes emaranhados passem a mesma informação	O emaranhamento ocorre quando grupos de partículas ou ondas são geradas ou interagem de tal maneira que o estado quântico de cada partícula ou onda... “ É possível emaranhar fótons, as partículas de luz, eles passam a ter essa ligação entre si, por exemplo, quando são gerados ambos a partir de uma outro fóton de energia maior e é possível fazer com que um feixe de luz, fazendo-o atravessar algum tipo de cristal como nos exemplos do slide.” “ o entrelaçamento quântico foi chamado de ação fantasmagórica a distância.”
Y	Só vai acontecer o emaranhamento se houver os dois [polarizadores] no mesmo ângulo. Ex: 90° com 90°; ou horizontal e vertical. Se não houver os ângulos citados acima, irá haver probabilidade do emaranhamento, porque você só irá estar na fase de superposição.	
C	Os dois tem que está a 90°, pois para ter detecção os dois tem que está na mesma direção	No emaranhamento não podemos supor o resultado, pois para saber os resultados temos que ver como está sendo executado[experimento]. Quando temos duas partículas sempre uma vai ser para cima e a outra para baixo, somente uma partícula interfere o resultado da outra. Quando soltamos um fóton por vez precisamos de 0° e 90°.
A	Para que ocorra a percepção do emaranhamento é necessário que eles estejam na mesma direção em 90°	Eu entendi que os fótons são ligados através do emaranhamento, ao passar pelos tubos [cristal não linear referente ao IVMZ] eles se dividem e refletem. [Logo,] O que o de um estiver voltado para cima o outro obrigatoriamente vai está voltado para cima. “O entrelaçamento ocorre mesmo que as partículas estejam separadas”
CA	90 graus nos dois	Quando duas partículas estão emaranhadas

- mesmo que cada uma esteja em um canto diferente, algumas propriedades delas estão relacionadas, sabendo a posição de uma delas, podemos saber a outra. Mexendo em uma, automaticamente, a outra é afetada.
- B** Para que se tenha detecção do fóton é necessário que os polarizadores estejam no 0° para que a imagem esteja bem clara, no caso, sem interrupção, pois a imagem será transmitida sem interrupção. Eu entendi que emaranhamento ocorre quando duas partículas estão conectadas de forma a instantaneamente compartilharem seus estados físicos. Então, para que tenha detecção do fóton, é necessário que os polarizadores estejam no ângulo de 0° ou 45° graus, pois a imagem será transmitida sem interrupção. Dois fótons, partículas de luz, eles passam a ter essa ligação de energia entre si.
- YS** Os polarizadores tem que está a 45° a 45° , pois estão na mesma direção. Eu entendi que os fótons para passar pelo [detector] do emaranhamento tem que está na mesma posição independente de quantos graus tiver, mas quanto for menor o grau, fica mais fácil de passar. Alguns fótons podem sofrer algumas alterações na sua passagem [pelo polarizador].
- NY** Acho que colocando um na vertical e outro na horizontal e ambos em zero graus. Ou então, colocando um em 90° e outro em 0° O emaranhamento é correlação entre duas partículas que estão separados, por exemplo, um fóton que está em um lado do braço A é igual ao que está do outro lado B. Ao colocar luz em um cristal não linear e enviarmos partículas emaranhadas as respostas que teremos entre elas é variada a depender do ângulo dos polarizadores .
- ME** Os dois [polarizadores] em 0° graus, pois é necessário estarem na mesma direção, para que aja detecção dos fótons Entendi que no emaranhamento cria uma conexão aos objetos de massa, tendo uma comunicação entre si independente do movimento dos seus átomos serem diferentes. “Na polarização com emaranhamento é necessário que os polarizadores estejam na mesma direção e estando sempre na vertical, possibilitando a passagem dos feixes de luz”
- D** Para que se tenha a detecção do fóton é necessário que os polarizadores estejam a 0° , pois a imagem será transmitida sem interrupção. O polarizador auxilia na transmissão da luz, de um ponto inicial para um ponto final. Entretanto, esses polarizadores estejam no ângulo correto. Assim, é possível desenvolver e formar o emaranhamento quântico.
- LB** Um estaria a 45° e o outro 45° também. No emaranhamento, não podemos supor um resultado antes de fazer o experimento, porque eles ficam em superposição, que é uma posição indeterminada de saber, antes de realizar o experimento. Quando dois fótons estão correlacionados, eles obrigatoriamente devem está em direções iguais.

- MC Ambos[polarizadores] em 40° , pois acho que por estarem emaranhados tem que seguir mesma linha [de comunicação]. Entendi sobre o emaranhamento dos fótons que obrigatoriamente estarão em direções opostas independente da distância é algo muito curioso como se fosse uma linha de comunicação instantânea. E no experimento, entendi que para ocorrer a identificação dos fótons, os polarizadores tem que está na mesma direção.
- J $0^\circ/0^\circ$, $90^\circ/90^\circ$, $45^\circ/45^\circ$. Precisamos que os polarizadores estejam na vertical. Parece transmitir informações mais rápido do que a velocidade da luz... Existe uma relação de duas partículas que estão separadas. Se um tiver apontando para cima, automaticamente, a outra estará apontando para cima.
- LF Os dois[polarizadores] devem estar em 45° , ou seja, na vertical para que os dois laser possam ultrapassar o polarizador. Devem estar na mesma direção. No emaranhamento não podemos supor o resultado, no caso do spin, eles não podem estar na mesma direção, eles devem estar obrigatoriamente em posições opostas. Isso pode acontecer mesmo que eles estejam a quilômetros de distância.
- M 90° e 90° Em relação ao emaranhamento, quando se trata do spin estão em superposição, não podemos afirmar se estão para cima ou para baixo. Com o experimento, há uma regra no qual diz que se um spin está para cima a outra obrigatoriamente está para baixo. Como maior exemplo, temos a moeda, se jogarmos uma e cair coroa, a outra cairá cara. No simulador pude entender que ao ativar o laser, saíram fótons que para passarem pelos polarizadores precisam está com mesmo ângulo.
- VH Os dois [polarizadores] devem ficar no ângulo de 90° . Assim, eles ficam alinhados em conjunto... No caso, eles precisam ficar sempre no mesmo ângulo para que ocorra a passagem da luz.
- YE O emaranhamento ocorre quando duas partículas estão conectadas e compartilham seu estado físico, não importando a distância que os separa.

As expectativas dos alunos, no primeiro momento, estavam intimamente ligadas a concepção clássica de polarização. Além disso, através das respostas antes da detecção todos os alunos acreditavam que os fótons deveriam ser detectados simultaneamente, relacionando com o fenômeno quântico discutido anteriormente. Porém, após a realização da simulação, perceberam situações experimentais que não permitiram o entendimento completo do

fenômeno físico, por exemplo, a maioria acreditava que o ângulo entre os polarizadores deveriam ser iguais nos ângulos de 90° e 0° para ocorrer detecção. Por outro lado, não conseguiram perceber sozinhos que independente do ângulo, se forem iguais, implica estarem paralelos e, conseqüentemente, a probabilidade maior de detecção. Vale salientar que os estudantes buscaram extrapolar a simulação, buscando estabelecer uma hipótese baseada nos conceitos estudados nas aulas que pudessem justificar o comportamento contraintuitivo do experimento virtual.

As respostas dos(as) alunos(as) YS, NY, ME,D, MC, M, J, A revelam uma percepção que fenômeno apresentado no IVMZ é o emaranhamento de fótons polarizados paralelamente, ou seja, as direções de propagação dos fótons ao interagirem com os polarizadores, necessariamente, precisam coincidir para haver as detecções simultâneas. Logo, não são possíveis detecções individuais. Ademais, os alunos LB e M conseguiram associar o fenômeno da superposição quântica na simulação do EQ, uma vez que não é possível determinar a direção de propagação do fóton polarizado antes da medição.

Após o reconhecimento do emaranhamento de fótons polarizados e sua natureza probabilística, inerente a fenômenos da MQ, os estudantes foram incentivados a calcular a probabilidade de detecção referente a configuração experimental sugerida. O professor, inicialmente, demonstrou como determinar a probabilidade, envolvendo funções trigonométricas. Em seguida, os estudantes foram incentivados a realizarem seus cálculos. Neste momento da aula, alguns estudantes demonstraram dificuldade de resolver, apesar de alegarem ser fácil de ser operacionalizada. Dividi os estudantes em dupla e, ao final da aula, compararam com os valores teóricos do IVMZ.

Convém dizer que, após aplicação, percebemos a importância de trabalhar a determinação probabilística em mais uma aula, afim de dar uma maior atenção aos estudantes que precisam de um tempo maior para operacionalização matemática, visto que os processos de ensino e aprendizagem são idiossincráticos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho foi apresentar uma estratégia didática bem fundamentada teoricamente, seja pelo referencial de ensino de física Lev Vygotsky, bem como pelo conceitos físicos associado a mecânica quântica.

As respostas presentes nas tabelas 6 e 7 possibilitaram uma percepção de um maior amadurecimento nas respostas e análises feitas pelos estudantes, apesar de não apresentarem o

domínio do conceito físico, houve uma construção, (res)significação do conceito (consonante com a teoria vygotskiana) físico da MQ. Uma conclusão que nos parece plausível é que, ao falarmos de conceitos clássicos, como onda e partícula, e dos resultados obtidos através dos mediadores semióticos e sociais, foi possível agir na zona de desenvolvimento proximal dos participantes da pesquisa, para que se apropriassem da ideia do emaranhamento quântico

A teoria de aprendizagem Vygotskiana foi fundamental para o resultado positivo durante a aplicação da SD, uma vez que possibilitou que os alunos externassem através da fala e escrita os conceitos aprendidos sozinho, presentes na zona de desenvolvimento real, e o que pensaram, (res)significaram através da interação social, bem como na interação semiótica. Sendo assim, possível que emergissem dúvidas dos alunos que estavam além do que foi planejado pelo professor e enriquecendo as discussões.

Obviamente, temos críticas sobre a SD aplicada que serviram para melhor conceber o produto educacional. Em tempo, gostaríamos de sinalizar a dificuldade no processo de aquisição de dados na sala de aula via oral, porém, estamos trabalhando no desenvolvimento de uma estratégia mais eficaz para captação dos áudios dos estudantes, inclusive entre os pares. Pretendemos reaplicar a SD mais adiante afim de obter um trabalho ainda mais coeso e próximo dos objetivos estabelecidos.

A perspectiva desse trabalho, além de perceber a aprendizagem dos alunos sobre o conceito de emaranhamento quântico, é despertar a discussão sobre a área de ensino de FMC e possibilitar um material que auxilie o professor na inserção dos tópicos da MQ no ensino médio, mais especificamente o emaranhamento quântico.

6. REFERÊNCIAS

- ALCÁCER, L. **Introdução à química quântica computacional**. energia, v. 265, n. 268, p. 273, 2007.
- BECK, M. **Quantum mechanics: theory and experiment**. Oxford University Press. (2012).
- BRASIL. Governo Federal. **Base Nacional Comum Curricular: Fundamentos Pedagógicos e Estrutura Geral da BNCC**: versão final, Brasília, 2018. Disponível em: Acesso em: 13 de dezembro de 2022.
- _____. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (Semtec). **PCN+ Ensino médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC/Semtec, 2006.
- COELHO, G. et al. **A importância da mediação para o ensino: uma revisão de literatura a luz dos referenciais de vygotsky**. Revista InterCiência-IMES Catanduva, v. 1, n. 1, p. 3-3, 2018.
- COSTA, L. G.; BARROS, M. A. **O ensino da física no Brasil: problemas e desafios**. In: VII Congresso Nacional de Educação (EDUCERE). 2015.
- CORDOVIL, J. L. **O que é um objecto quântico?: uma investigação sobre as implicações epistemológicas e ontológicas desta questão**. 2012..
- DA SILVA NETTO, J., DE HOLANDA CAVALCANTI, C. J., & OSTERMANN, F. **Dificuldades e estratégias para compreensão do conceito de emaranhamento quântico: um estudo na formação inicial de professores de Física**. Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 1-36, 2019.
- DAVIDOVICH, L. **Os quanta de luz e a ótica quântica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 37, n. 4, p. 4205-1-4205-12. 2015.
- DA SILVA, J. M. C. **Revisão de estudos sobre emaranhamento quântico**. In: I Workshop em Ensino de Física do Tocantins, 2017.
- DE PEREIRA, A. P.; JUNIOR, P. L. **Implicações da perspectiva de Wertsch para a interpretação da teoria de Vygotsky no ensino de Física**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 31, n. 3, p. 518-535, 2014.
- DELL'ISOLA, Valéria Cássia; MEDEIROS, Alberto Rezende. **A influência do Marxismo na teoria de Vygotsky sobre linguagem e aprendizado**. REVISTA DE TRABALHOS ACADÊMICOS–UNIVERSO BELO HORIZONTE, v. 1, n. 1, 2016.
- DORNELES, P. F. T.; ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A. **Integração entre atividades computacionais e experimentais como recurso instrucional no ensino de eletromagnetismo em física geral**. Ciência & Educação (Bauru), v. 18, n. 1, p. 99-122, 2012.
- HENRIQUE, F. R. **O paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen**. 2014. Disponível em: <http://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2014-1%20SFI5774%20Mecanicaquantica/Seminario%20-%20Franciele%20-%20Einstein-Podolski-Rosen.pdf>. Acesso em: 04/03/2020.
- JESUS, José Carlos Oliveira de. **Concepções teórico-epistemológicas de estudantes de graduação em física: marcas de imaginário e de discurso científico**. Tese (Doutorado em educação)- Faculdade de Educação - Universidade Federal da Bahia, 2010.

MAIA, G. O. R. **Interação da radiação com a matéria e implicações para o ensino da mecânica quântica: o caso do efeito fotoelétrico.** Dissertação (Mestrado Nacional em Ensino de Física) - MNPEF - POIO 06 -UEFS, 2016.

MAIA NETO, Paulo A. et all. **Física 4A. v. único.** – Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ, 2010.

MICHINEL MACHADO, J. L. et al. **O funcionamento de textos divergentes sobre energia com alunos de Física: a leitura no ensino superior.** 2001.

MOREIRA, M. A. **Uma análise crítica do ensino de Física.** Estudos avançados, 32(94), 73-80. 2018.

MOZENA, Erika Regina; OSTERMANN, Fernanda. **A interdisciplinaridade na legislação educacional, no discurso acadêmico e na prática escolar do Ensino Médio: panaceia ou falácia educacional?.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 92-110, 2016.

NETTO, J. D. S., OSTERMANN, F., & CAVALCANTI, C. J. D. H. **Fenômenos intermediários de interferência e emaranhamento quânticos: o interferômetro virtual de Mach-Zehnder integrado a atividades didáticas.** Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 35, n. 1 (abr. 2018), p. 185-234. 2018.

NETTO, J. D. S. **Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico na formação de professores de Física segundo a perspectiva sociocultural.** 2015.

NETO, R. A. D. C. **internalização do significado da teoria quântica do processo de medida de acordo com a interpretação da complementaridade.** 2016.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de física básica: Ótica, relatividade, física quântica (vol. 4).** Editora Blucher, 2014.

OLIVEIRA, M. K. **Vygotsky: aprendizado e desenvolvimento-um processo sócio-histórico.**1993.

OSTERMANN, F. and Moreira, M. A., **Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”**, Investigações em Ensino de Ciências 5, 23-48, 2000.

OSTERMANN, F., & PRADO, S. D. **Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder.** Revista Brasileira de Ensino de Física, 27(2), 193-203, 2005.

PESSOA JR, O. **Conceitos de Física Quântica 1.** Editora Livraria da Física, 2003.

_____**Conceitos de Física Quântica.** 1 ed., vol. 2. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2006.

_____**Física quântica: entenda as diversas interpretações da física quântica.** Apostila. Disponível em . Acesso em 5 mar. 2016. São Paulo: Site Vya Estelar. 2007. 175 p.

PERES, Asher. **What is a state vector?.** American Journal of Physics, v. 52, n. 7, p. 644-650, 1984.

ROCHA, J. F. (Ed.). **Origens e evolução das idéias da física.** SciELO-EDUFBA, 2002.

ROCHA, C. R.; HERSCOVITZ, V. E.; MOREIRA, M. A. **Uma revisão da literatura em publicações de 2010 a 2016 sobre o ensino de conceitos fundamentais de Mecânica Quântica.** Latin-American Journal of Physics Education, v. 12, n. 1, p. 6, 2018.

RICCI, T. F., OSTERMANN, F., & PRADO, S. D. **O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da Física Quântica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, 29(1), 79-88, 2007.

SILVA NETO, J. da; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. **O tema da dualidade onda-partícula na educação profissional em radiologia médica a partir da simulação do interferômetro de Mach-Zehnder.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 1, p. 01-10, 2011.

SOBRAL, J. B. M., & MACHADO, R. B. **Computação Quântica: Aspectos Físicos e Matemáticos- Uma Abordagem Algébrica,** 2019.

VYGOTSKI, L. **Psicologia concreta do homem.** Educação & Sociedade, n. 71, pp. 23-44, 2000.

_____ **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores.** São Paulo: Martins Fontes, 1998.

_____ **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores.** 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

APÊNDICE A –TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Eu, KLINSMANN PATRICK DOS SANTOS, matriculado sob o número 15111133 no Programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNEPF), Polo 06, da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), orientado pelo professor ALVARO SANTOS ALVES e coorientado pelo professor RODOLFO ALVES DE CARVALHO NETO, gostaria de obter o consentimento para o(a) maior _____ participar da pesquisa intitulada

ENSINO DE EMARANHAMENTO QUANTICO NO ENSINO MÉDIO UTILIZANDO A PERSPECTIVA SOCIOINTERACIONISTA DE VYGOTSKY: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARTINDO DO CLÁSSICO PARA O QUÂNTICO, que será realizada no COLÉGIO ESTADUAL ANTÔNIO BALBINO, no município de MADRE DE DEUS - BA.

O MNEPF é um programa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), gerido pela Sociedade Brasileira de Física (SBF), que busca qualificar professores de ensino médio e fundamental com ênfase principal em aspectos de conteúdos de Física, além das técnicas atuais de ensino para aplicação em sala de aula. Portanto, o objetivo deste trabalho é elaborar e aplicar uma sequência didática para ensinar aos estudantes da 3ª série do Ensino Médio conceitos da Física Clássica, Moderna e Contemporânea focando os conceitos físicos de ondas, polarização, difração, interferência, estados clássicos e quânticos, interpretação da complementaridade, superposição e emaranhamento quântico.

A participação nesta pesquisa é opcional, e fica assegurado o direito à desistência em qualquer fase de realização da pesquisa, sem qualquer ônus ou penalidades. Caso consinta a participação do(a) menor nesta pesquisa, cumpre-nos informar que durante o desenvolvimento das atividades, serão aplicados questionários, em diferentes momentos, contendo questões avaliativas dos conhecimentos ministrados, bem como o registro das falas dos estudantes utilizando dispositivo gravador de áudio. Além disso, o(a) menor fará leitura de uma cartilha ilustrada como pré-requisito para discussão e análise do fenômeno físico do emaranhamento quântico. Os resultados decorrentes dessa aplicação serão analisados na perspectiva da Teoria sociointeracionista de Lev Vygotsky.

Os conhecimentos produzidos nessa pesquisa serão socializados com os discentes e a instituição de ensino, além disso, está prevista a divulgação dos resultados, na forma de dissertação, artigos científicos e apresentação em eventos científicos. A ética na pesquisa científica assegura que os dados pessoais serão mantidos sob rigoroso sigilo; de sorte que não serão divulgadas a identidade do participante bem como o local da pesquisa.

Colocamo-nos à disposição para esclarecimentos antes e durante a realização da pesquisa, através do telefone (75) 3616-8229, ou do endereço da Secretaria do Mestrado Profissional em Ensino de Física, da Universidade Estadual de Feira de Santana: Avenida Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Campus UEFS, Módulo Administrativo V, onde os questionários serão arquivados, durante um período de cinco anos, sob responsabilidade do mestrando, e, após este prazo, todos os registros serão destruídos. Caso você se sinta totalmente esclarecido e concorde em participar da pesquisa autorizando o uso das informações para fins científicos como a elaboração da dissertação, artigos científicos e apresentação em eventos científicos, o convidamos a assinar esse termo de consentimento em duas vias, ficando você com uma cópia do mesmo e outra com o mestrando.

Reiteramos que a participação nesse projeto de pesquisa não implica em qualquer ônus para os participantes em momento algum da pesquisa.

Feira de Santana, 18 de julho de 2022.

(assinatura do maior)

Nome do Mestrando / Tel: (075991757524)

APÊNDICE B - TERMO DE ASSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado(a) como voluntário(a) a participar da pesquisa que será realizada no COLÉGIO ESTADUAL ANTONIO BALBINO no município de MADRE DE DEUS- BA. O MNEPF é um programa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob a coordenação da Sociedade Brasileira de Física (SBF), que busca qualificar professores de ensino médio e fundamental com ênfase principal em aspectos de conteúdos de Física, além das técnicas atuais de ensino para aplicação em sala de aula. Portanto, o objetivo deste trabalho é promover aprendizagem do conceito físico de emaranhamento quântico utilizando uma perspectiva sociointeracionista.

A participação nesta pesquisa é opcional, e fica assegurado o direito à desistência em qualquer fase de realização da pesquisa, sem qualquer ônus ou penalidades. Caso aceite participar desta pesquisa, cumpre-nos informar que durante o desenvolvimento das atividades, serão aplicados questionários, em diferentes momentos, contendo questões avaliativas dos conhecimentos ministrados, bem como o registro das falas dos estudantes utilizando dispositivo gravador de áudio. Além disso, você fará leitura de uma cartilha ilustrada como pré-requisito para discussão e análise do fenômeno físico do emaranhamento quântico. Os resultados decorrentes dessa aplicação serão analisados na perspectiva da Teoria sociointeracionista de Lev Vygotsky.

Para participar deste estudo, o responsável por você deverá autorizar e assinar um termo de consentimento. Você não terá nenhum custo, nem receberá qualquer vantagem financeira. Você será esclarecido(a) em qualquer aspecto que desejar e estará livre para participar ou recusar-se. O responsável por você poderá retirar o consentimento ou interromper a sua participação a qualquer momento. A sua participação é voluntária e a recusa em participar não acarretará qualquer penalidade. A ética na pesquisa científica assegura que os dados pessoais serão mantidos sob rigoroso sigilo; de sorte que não serão divulgados a identidade do participante bem como o local da pesquisa. Os resultados estarão à sua disposição quando finalizada a pesquisa. Os dados e instrumentos utilizados na pesquisa ficarão arquivados com o pesquisador responsável por um período de 5 anos, e após esse tempo serão destruídos. Este termo de consentimento encontra-se impresso em duas vias, sendo que uma cópia será arquivada pelo pesquisador responsável, e a outra será fornecida a você.

Eu, _____, portador(a) do documento de Identidade _____ (se já tiver documento), fui informado(a) dos objetivos do presente estudo de maneira clara e detalhada e esclareci minhas dúvidas. Sei que a qualquer momento poderei solicitar novas informações, e o meu responsável poderá modificar a decisão de participar se assim o desejar. Tendo o consentimento do meu responsável já assinado, declaro que concordo em participar desse estudo. Recebi uma cópia deste termo assentimento e me foi dada a oportunidade de ler e esclarecer as minhas dúvidas.

FEIRA DE SANTANA , 18 de julho de 2022.

