



UEPB

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

CAMPUS I

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIA E EDUCAÇÃO
MATEMÁTICA**

CLAUDSON EDUARDO ARAÚJO BARBOSA BARROS

**CONCEPÇÕES DE PROFESSORES DE FÍSICA SOBRE O PARADOXO DE EPR:
IMPLICAÇÕES NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES**

CAMPINA GRANDE - PB

2022

CLAUDSON EDUARDO ARAÚJO BARBOSA BARROS

**CONCEPÇÕES DE PROFESSORES DE FÍSICA SOBRE O PARADOXO DE EPR:
IMPLICAÇÕES NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES**

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

Área de concentração: Ensino de Ciências e Educação Matemática.

Linha de Pesquisa: Metodologia, Didática e Formação do Professor no Ensino de Ciências e Educação Matemática

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros.

CAMPINA GRANDE - PB

2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B277c Barros, Claudson Eduardo Araújo Barbosa.
Concepções de professores de física sobre o paradoxo de
EPR [manuscrito] : implicações na formação de professores /
Claudson Eduardo Araújo Barbosa Barros. - 2022.
75 p. : il. colorido.

Digitado.

Dissertação (Mestrado em Acadêmico em Ensino de
Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual da
Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Marcos Antônio Barros ,
Coordenação do Curso de Física - CCT."

1. Ensino básico. 2. Mecânica quântica . 3. Einstein-
Podolsky-Rosen (ERP). I. Título

21. ed. CDD 530.12

CLAUDSON EDUARDO ARAÚJO BARBOSA BARROS

**CONCEPÇÕES DE PROFESSORES DE FÍSICA SOBRE O PARADOXO DE EPR:
IMPLICAÇÕES NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES**

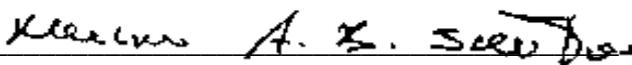
Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

Área de concentração: Ensino de Ciências e Educação Matemática

Linha de Pesquisa: Metodologia, Didática e Formação do Professor no Ensino de Ciências e Educação Matemática

Aprovada em: 22 / 04 / 2022

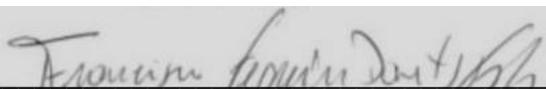
BANCA EXAMINADORA



Dr. Marcos Antônio Barros Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)
Orientador



Prof. Dra. Alexandra Chaves Braga
Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
Examinador externo



Prof. Dr. Francisco Ferreira Dantas Filho
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)
Examinador interno

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa à minha mãe, Jaane Araújo Barbosa Barros, e ao meu pai, Claudimilson de Souza Barros, por me proporcionarem uma educação que formou, com êxito, meu ímpeto em construir o meu futuro. Também dedico à todos os meus familiares que me ajudam a me tornar um ser humano cada dia melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Aos meus pais pelo incentivo contínuo e ensinamentos prestados no decorrer de toda minha vida para que eu pudesse realizar este sonho.

À minha companheira, Thaynara Meneses Sousa Moreira, que esteve e permanece comigo nos momentos mais difíceis, se pondo à disposição para ajudar no que esteve ao seu alcance.

Ao professor Marcos Barros pela orientação prestada e pelo incentivo para conclusão desta pesquisa, pois em houve momentos em que pensei na desistência, mas devido à sua presteza, tornou-se possível a conclusão desta pesquisa.

Aos membros da banca, Francisco Ferreira Dantas Filho e Alexandra Chaves Braga, pela presença, disposição e pelos enriquecedores debates e orientações.

Aos professores que compõem o quadro do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática que me proporcionaram a construção de conhecimentos necessários para esta pesquisa. Em Especial, os professores Silvanio de Andrade e Francisco Ferreira Dantas Filho que compartilharam conhecimentos e, num determinado momento, foram fundamentais para concretização deste sonho.

Aos colegas que conheci no decorrer do curso, pelos momentos de amizade e apoio, bem como aos voluntários que aceitaram os convites que foram essenciais para esta pesquisa. Minha sincera gratidão!

RESUMO

Esta pesquisa tem objetivo de analisar os discursos dos professores de Física acerca do paradoxo e EPR (Einstein-Podolsky-Rosen). Esse paradoxo consiste na simultaneidade de estados sobre um mesmo sistema, bem como na ideia de duas partículas separadas por uma longa distância cuja medição do estado de uma leva a definição do estado da outra, instantaneamente. Isso ocorre em decorrência da observação e é chamado de colapso da função de onda. Para EPR, a descrição formal da realidade física fornecida pela Mecânica Quântica para este experimento não é completa, pois não consegue descrevê-la sem que tenhamos de usar a probabilidade e a superposição de estados. Assim, a metodologia desta pesquisa adota a abordagem qualitativa do tipo explorativa, pois permite a compreensão detalhada de características de uma situação, possibilitando inferências sobre as conclusões. Nossa metodologia inicia aplicando essa pesquisa com seis professores de Física de forma remota em três encontros. Os principais critérios para seleção destes voluntários são: possuir licenciatura em Física, ferramentas que possibilitem os encontros remotos e disponibilidade de horários. Dessa forma, tivemos a aplicação de um questionário aberto no primeiro encontro e outro no terceiro encontro. A escolha pelo questionário aberto é justamente para permitir que os voluntários possam expressar seus pensamentos sem a interferência de opções. No segundo encontro foi abordado o conteúdo do paradoxo de EPR através de uma apresentação em *slides*, um vídeo e um simulador virtual envolvendo os conceitos de dualidade onda-partícula da luz e colapso da função. A partir dos dados coletados nos encontros, fizemos a categorização dos discursos com objetivo de traçar um Discurso do Sujeito Coletivo (DSC) para cada questionamento. Por fim, chegamos a algumas conclusões preocupantes uma vez que alguns professores citaram não ter entendido a Mecânica Quântica durante a licenciatura, demonstraram desordem de conhecimento e mudança de discursos quanto aos questionamentos voltados ao paradoxo de EPR. Outro fator preocupante foi a dificuldade de interpretação de alguns questionamentos.

Palavras-Chave: Paradoxo de EPR. Ensino básico. Discurso do Sujeito Coletivo. Mecânica Quântica.

ABSTRACT

This research aims to analyze the discourses of Physics teachers about EPR paradox (Einstein-Podolsky-Rosen). This paradox consists in the simultaneity of states on the same system, as well as in the idea of two particles separated by a long distance whose measurement of the state of one leads to the definition of the state of the other, instantly. This occurs as a result of observation and is called wavefunction collapse. For EPR, the formal description of physical reality provided by Quantum Mechanics for this experiment is not complete, as it cannot describe it without having to use probability and superposition of states. Thus, the methodology of this research adopts an exploratory qualitative approach, as it allows a detailed understanding of the characteristics of a situation, allowing inferences about the conclusions. Our methodology begins by applying this research with six Physics teachers remotely in three meetings. The main criteria for selecting these volunteers are: having a degree in Physics, tools that allow remote meetings and availability of schedules. Thus, we had the application of an open questionnaire in the first meeting and another in the third meeting. The choice of the open questionnaire is precisely to allow volunteers to express their thoughts without the interference of options. In the second meeting, the content of the EPR paradox was addressed through a slide presentation, a video and a virtual simulator involving the concepts of wave-particle duality of light and collapse of function. Based on the data collected in the meetings, we categorized the discourses with the aim of drawing up a Collective Subject Discourse (CSD) for each questioning. Finally, we reached some worrying conclusions since some professors mentioned that they did not understand Quantum Mechanics during their degree, showed knowledge disorder and change of discourses regarding the questions aimed at the EPR paradox. Another worrying factor was the difficulty of interpreting some questions.

Keywords: EPR paradox. Basic education. Collective Subject Discourse. Quantum Mechanics.

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Relação de atividades e propósitos	39
Quadro 02 - Categorização dos discursos apresentados na questão 7 do primeiro questionário	46
Quadro 03 - Categorização dos discursos apresentados na questão 8 do primeiro questionário	47
Quadro 04 - Categorização dos discursos apresentados na questão 1 do segundo questionário	51
Quadro 05 - Categorização dos discursos apresentados na questão 2 do segundo questionário	53
Quadro 06 - Categorização dos discursos apresentados na questão 3 do segundo questionário	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACs	Ancoragens
DSC	Discurso do Sujeito Coletivo
EaD	Ensino à Distância
E-ch	Expressões-chaves
ENEM	Exame Nacional do Ensino Médio
EPR	Einstein-Podolsky-Rosen
FC	Física Clássica
FQ	Física Quântica
FMC	Física Moderna e Contemporânea
HFC	História e Filosofia da Ciência
ICs	Ideias Centrais
MC	Mecânica Clássica
MQ	Mecânica Quântica
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PNLD	Plano Nacional do Livro Didático
PPGECM	Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática
TDIC	Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação
TVO	Teoria das Variáveis Ocultas
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
V_A	Voluntário A
V_B	Voluntário B
V_C	Voluntário C
V_D	Voluntário D
V_E	Voluntário E
V_F	Voluntário F

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	“Quanta de luz”
h	Constante de Planck, equivalente a $6,55 \times 10^{-27}$ erg.s ou $6,626 \times 10^{-34}$ m ² kg / s
ν	Frequência
k_B	Valor constante equivalente a $1,346 \times 10^{-16}$ erg/K
e	Carga elétrica elementar, cujo valor foi dado por $4,69 \times 10^{-10}$ E.S.U.
ψ	Função de onda
$ \psi ^2$	Densidade de carga elétrica
S_x	Grandeza física quaisquer
S_z	Grandeza física quaisquer
t	Letra representativa da grandeza tempo
a_k	Autovalores da quantidade física A
b_r	Autovalores da quantidade física B
P	Letra representativa de uma quantidade física quaisquer
Q	Letra representativa de uma quantidade física quaisquer
π	Letra grega pi. Esta é a razão entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência de valor aproximado de 3,14
i	Parte imaginária de um número complexo, cujo valor é $\sqrt{-1}$
p	Letra representativa de uma grandeza física chamada momento
ξ	Letra representativa para a diferença entre posições x_1 e x_2 . $\xi = x_1 - x_2$
δ	Letra grega delta, utilizada para representar o delta de Dirac na função Delta de Dirac ($\Psi = \delta(x_1 - x_2 - a)$).

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 REVISÃO DE LITERATURA	15
1.1 A FMC no ensino básico: o que dizem os documentos legais?	15
1.2 O que diz a literatura?	17
1.3 A necessidade do estudo conceitual	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 O Paradoxo de EPR	21
2.1.1 Contextualização histórica	21
2.1.2 Aspectos teóricos do paradoxo de EPR	27
2.1.2.1 <i>O princípio da incerteza</i>	27
2.1.2.2 <i>Concepções de Completude e Realismo para EPR</i>	28
2.1.2.3 <i>Argumentos de EPR</i>	28
2.1.3 O experimento mental	30
2.2 As contribuições filosóficas do Círculo de Bakhtin	31
2.3 Transposição Didática	33
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	36
3.1 Descrição e tipologia da pesquisa	36
3.2 O sujeito da pesquisa	37
3.3 Aspectos da aplicação da pesquisa	37
3.3.1 Ensino Remoto	38
3.3.2 A coleta de dados	38
3.3.3 Levantamento das concepções	39
3.3.4 O Discurso do Sujeito Coletivo: DSC	42
3.3.4.1 <i>O discurso do sujeito coletivo: categorização</i>	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Análise de dados coletados no primeiro questionário	44
4.1.1 Conhecendo os voluntários	44
4.1.2 Os discursos do primeiro encontro	45
4.2 Análise da abordagem do tema	49
4.3 Análise de dados coletados no segundo questionário	50
4.3.1 O que dizem os voluntários sobre o tema?	55
CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	60

INTRODUÇÃO

Estudando os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea (FMC) em minha licenciatura em Física, não obtive a oportunidade de explorá-la mais profundamente e realizar uma pesquisa envolvendo temas dessa área de conhecimento. Apesar disso, tive a oportunidade de trabalhar os conhecimentos da FMC no ensino básico e sempre me questioneei sobre os porquês desse tema não ser tão explorado nessa fase de estudos. Entretanto, ao ingressar no mestrado, me deparei com a disciplina de História e Filosofia das Ciências e da Matemática lecionada com excelência pelo professor Marcos Barros, com quem tive a oportunidade de debater sobre o tema e propor uma investigação sobre o tema no âmbito da formação de professores.

Assim, escolha do tema para esta pesquisa de dissertação está diretamente relacionada às situações vivenciadas ao longo das nossas atividades acadêmicas. A sua idealização ocorreu durante o semestre 2019.1 no decorrer das atividades propostas no mestrado acadêmico em Ensino de Física do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba. A proposta inicial, mas esta foi reavaliada em comum acordo com o professor orientador e posteriormente reformulada com maior objetividade para esta versão.

Nossa concepção inicial pressupunha fazer uma análise acerca do entendimento dos professores de Física do ensino básico a respeito da compreensão dos fenômenos atômicos vinculados a FMC. Essa análise nos mostrou o óbvio, ou seja, a leitura dos diversos artigos nos apontava, de forma significativa, para uma percepção estéril e superficial por parte dos alunos e professores, acerca das ideias fundamentais da Mecânica Quântica (MQ).

Nesse sentido, precisávamos ser mais específicos, ou seja, pontificar ou condensar um dos assuntos relacionados à FMC, no sentido de se ter uma ideia mais próxima da realidade dos pesquisados em relação a um desses assuntos que podem ser, por eles, abordados. Assim, nasceu a necessidade de verificar *in loco* um dos assuntos mais controversos da Mecânica Quântica (MQ), que trata do paradoxo de EPR (Einstein, Podolsky e Rosen), cuja importância reside no fato de ser o ponto de partida para a compreensão de diversos fenômenos presentes no cotidiano da maioria dos alunos e professores.

Esse paradoxo retrata sobre uma situação corriqueira na ciência e foi proposto como refutação à forma como a MQ descrevia a realidade física, uma vez que o formalismo quântico fornecia respostas probabilísticas e permitia a superposição de estados para um mesmo sistema. Assim, a ideia dessa proposta consiste num experimento mental com dois sistemas separados

por uma longa distância e que a medição de um estado de um dos sistemas define o estado do outro sistema simultaneamente. Além disso, a ideia divulgada por EPR mostra que um mesmo sistema pode ter realidades simultâneas, no qual o mesmo sistema pode ser descrito por duas funções distintas, algo inaceitável para os autores.

De posse do levantamento inicial da literatura, amplamente utilizada no primeiro capítulo, evidenciamos Marques et al (2019) e Moreira (2018). Esses autores destacam fortemente que a FMC é pouco vista no ensino básico e, em muitos casos, é mal compreendida no ensino superior, não contribuindo para a formação dos professores de Física, tendo em vista que esses assuntos representam obstáculos pedagógicos e epistemológicos, à sua compreensão.

Por outro lado, os documentos oficiais, a exemplo dos Parâmetros Curricular Nacional (PCN+), apontam para a necessidade de inclusão da chamada Física Moderna no ensino básico, uma vez que a mesma é indispensável à compreensão mais abrangente da constituição da matéria, dos modelos atômicos e das radiações, como temas essenciais a vida. Todas essas diretrizes nos levou a formular o objetivo desta pesquisa.

Diante desses pressupostos, este trabalho de pesquisa tem como objetivo geral analisar as concepções de alguns professores de Física do ensino básico, acerca do paradoxo EPR. Tendo como premissa a possibilidade de estruturar um discurso representativo dos voluntários. Ainda dentro desse contexto, após a identificação dessas concepções, recorreremos a dois objetivos específicos dentro de uma sequência lógica que permite-nos trabalharmos essas concepções de forma contínua.

O primeiro objetivo específico refere-se à aplicação de um questionário aberto, cuja intenção é propiciar a livre expressão dos voluntários acerca do tema conforme à questão apresentada. Esse questionário é proposto em dois momentos e possibilita a análise de mudança na estrutura dialógica dos discursos. O segundo objetivo específico diz respeito à utilização de uma adequada transposição didática, no qual privilegiaremos os aspectos histórico, conceitual e fenomenológico que envolve esse paradoxo, com o intuito de provocar mudanças conceituais nas concepções expressas pelos voluntários.

O terceiro objetivo específico está relacionado à análise dos discursos apresentados nos questionários e, possivelmente, na abordagem do conteúdo. Com isso, será possível observar possíveis alterações no conhecimento exposto pelos professores pesquisados.

Assim, acreditamos que a relevância desta pesquisa reside no fato de que a utilização dessa sequência metodológica provocará alterações nas concepções expressas pelos professores pesquisados, mostrando que é possível a aprendizagem desse assunto e validando a ideia dessa pesquisa.

Esta dissertação se encontra dividida em cinco capítulos, que contemplam todos os processos de desenvolvimento seguidos por seus respectivos objetivos. No primeiro capítulo, chamado de revisão de literatura, recorreremos a recentes artigos de Moreira (2018), Marques et al (2019), Tenfen e Tenfen (2017), Siqueira (2006), dentre outros, que realizaram uma densa revisão de trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais, sobre o ensino de FMC e de MQ. O principal objetivo desse capítulo é identificar os resultados obtidos por esses pesquisadores, frisando o fato de que a FMC é pouco vista no ensino fundamental e mal compreendida no ensino superior.

O segundo capítulo é dedicado à fundamentação teórica. Nesse capítulo, realizamos um levantamento dos fundamentos teóricos (postulados e princípios), em relação ao paradoxo EPR, além dos seus aspectos históricos. Além disso, incluímos uma descrição teórica sobre as ideias filosóficas do Círculo de Bakhtin, trazidas por Faraco (2009), para uma análise e entendimento do conteúdo presente nos discursos tanto na perspectiva linguística, como no âmbito filosófico-conceitual. Ainda neste capítulo, incluímos também uma explanação acerca da transposição didática, por Chevallard (1991), no sentido de nos fundamentar a respeito de como abordar e transpor didaticamente o assunto em questão.

No terceiro capítulo deste trabalho, chamado de metodologia da pesquisa, descrevemos de forma detalhada o procedimento metodológico de nosso estudo, em que foi priorizada a abordagem qualitativa. A opção por essa abordagem ocorreu em decorrência do contexto a ser investigado, permitindo-nos descrever, compreender e analisar como as concepções dos professores de física em relação ao paradoxo de EPR. Para esse estudo de caso, utilizamos um questionário como instrumento de coleta de dados em duas etapas, aqui chamados de pré-teste e pós-teste. Além disso, utilizamos a metodologia de análise de discurso DSC (Discurso do Sujeito Coletivo) proposto por Lefevre e Lefevre (2005). O motivo pelo qual escolhemos tais instrumentos se dá em função de suas peculiaridades e indicadores que são adequados para o entendimento da natureza do nosso problema de pesquisa.

No quarto capítulo, transcrevemos os dados coletados, realizamos a categorização dos discursos e elaboramos o DSC para cada questionamento pertinente ao paradoxo de EPR. Além disso, foram feitas algumas inferências sobre o conteúdo presente nos discursos, bem como mostramos a opinião dos voluntários acerca do tema abordado.

Por fim, no último capítulo, concluímos que é necessário abordar conteúdos que permitam aprimorar a criticidade dos alunos do ensino básico. Para isso, é essencial levar a FMC para a sala de aula, podendo adentrar, inclusive, no paradoxo de EPR. Entretanto, vimos que alguns professores demonstraram desordem de conhecimento e mudança de discursos.

Algo que previmos, mas ficou evidente que o conhecimento permanece vivo em suas mentes e que basta um pouco de dedicação para que esse patamar se modifique.

A seguir, veremos algumas considerações preliminares acerca do nosso problema de pesquisa e explanação teórica que são necessárias para o entendimento das ferramentas que utilizamos para a concretização dos nossos objetivos.

1 REVISÃO DE LITERATURA

Um dos grandes desafios do homem em relação aos fenômenos é justamente a compreensão acerca dos mesmos. Esta compreensão perpassa por fatores multidimensionais que se estendem desde o fator social daquele indivíduo até fatores intrínsecos no processo de ensino-aprendizagem à qual o indivíduo foi submetido durante o processo de construção do conhecimento.

Compreendemos o processo de ensino-aprendizagem como um sistema de interações que envolve alunos e professores (KUBO; BATOMÉ, 2001). Entretanto, tais interações estão baseadas em processos comportamentais que compreendem o “aprender” e o “ensinar”. Se desejamos que os alunos aprendam, temos de ter a iniciativa para ensinar, para abordar os conteúdos em sala de aula conforme são exigidos nos documentos legais.

Atualmente, a Física lecionada no âmbito do ensino básico, além de superficial, não compreende discussões mais atuais desta área de conhecimento. A exemplo disto, citamos a MQ que raramente é abordada neste nível de ensino. Dessa forma, existem alguns fatores que podem compor uma barreira na abordagem desta área de conhecimento. Alguns destes fatores vão desde o material didático utilizado, o projeto político pedagógico da escola, os planos de ensino e de aula, bem como a própria preparação do docente.

De imediato, podemos dizer os documentos legais que regem a educação brasileira não compõem essa barreira, pois os mesmos citam a necessidade da abordagem desta área de conhecimento. Vejamos, a seguir, o que dizem os documentos legais.

1.1 A FMC no ensino básico: o que dizem os documentos legais?

Ainda no ensino fundamental, os alunos têm o contato formal com a Ciência através de disciplinas que, de acordo com Brasil (1999), devem abranger a temática de Matéria e Energia. Neste mesmo documento, Brasil (1999, p. 351) aponta a necessidade dos alunos saberem “classificar as radiações eletromagnéticas por suas frequências, fontes e aplicações, discutindo e avaliando as implicações de seu uso em controle remoto telefone celular, raio X [...]”. Estes conteúdos supracitados fazem parte da FMC.

Outros conteúdos da FMC são propostos pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) ao indicar abordagens de conhecimentos que tenham ligação com o cotidiano e a vivência do aluno com dispositivos eletrônicos atuais, conforme explicita Brasil (1999) ao citar que:

A natureza ondulatória e quântica da luz e sua interação com os meios materiais, assim como os modelos de absorção e emissão de energia pelos átomos, são alguns dos exemplos que também abrem espaço para uma modelagem quântica da estrutura da matéria, em que possam ser modelados os semicondutores e outros dispositivos eletrônicos contemporâneos (BRASIL, 1999, p. 26).

Isso nos mostra que muitos dos conteúdos derivados da FMC têm alguma ligação com o cotidiano do aluno, pois são conhecimentos mais atuais e podem promover maior criticidade sobre temas relevantes, bem como a participação ativa na sociedade. Assim, o Plano Nacional do Livro Didático (PNLD) traz a necessidade de abordagens de conteúdos que sejam “imprescindíveis para o exercício da cidadania ativa, crítica e transformadora, bem como para a inserção ativa, crítica e transformadora no mundo do trabalho” (BRASIL, 2014, p. 16).

Ainda nesse âmbito, existem outras competências e habilidades globais das Ciências Naturais que estão associadas ao contexto sociocultural enfatizando a necessidade de “entender o impacto das tecnologias associadas às Ciências Naturais, na sua vida pessoal, nos processos de produção, no desenvolvimento do conhecimento e na sua vida social” (BRASIL, 1999, p. 13). A compreensão do funcionamento de tecnologias atuais e seus impactos perpassam pela FMC uma vez que tratamos constantemente de tecnologias que estão, intrinsecamente, ligadas à fenômenos quânticos, por exemplo.

Outra habilidade que nos chama atenção, em Brasil (1999, p. 557), diz que é necessário “interpretar resultados e realizar previsões sobre atividades experimentais, fenômenos naturais e processos tecnológicos, com base nas noções de probabilidade e incerteza, reconhecendo os limites explicativos das Ciências”. Este trecho mostra, por exemplo, a possibilidade da abordagem de um aparato experimental físico ou virtual acerca da dualidade onda-partícula ou, até mesmo, o paradoxo de EPR ainda no ensino básico. Os PCN+ (Parâmetros Curriculares Nacionais) sugerem que

alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria [...]. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas. Mas será também indispensável ir mais além, aprendendo a identificar, lidar e reconhecer as radiações e seus diferentes usos. Ou seja, o estudo de matéria e radiação indica um tema capaz de organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo material microscópico (BRASIL, 2002, p. 70).

Até o momento vimos que a FMC deve ser abordada no ensino básico, mas existe um fator que o PCN+ critica e está intimamente relacionado ao docente. Assim, existem críticas na

forma como os conceitos das áreas da Física são “selecionados” para serem ensinados. Dessa forma,

a seleção desse conhecimento tem sido feita, tradicionalmente, em termos de conceitos considerados centrais em áreas de fenômenos de natureza física diferentes, delimitando os conteúdos de Mecânica, Termologia, Ótica e Eletromagnetismo a serem abordados. Isso resulta, quase sempre, em uma seleção tal que os índices dos livros didáticos de ensino médio se tornam, na verdade, uma versão abreviada daqueles utilizados nos cursos de física básica do ensino superior, ou uma versão um pouco mais estendida dos que vinham sendo utilizados na oitava série do ensino fundamental. Nessas propostas, os critérios de seleção para definir os conteúdos a serem trabalhados, na maior parte das vezes, restringem-se ao conhecimento e à estrutura da Física, sem levar em conta o sentido mais amplo da formação desejada (BRASIL, 2002, p. 61).

Neste sentido, o PCN+ critica o ensino abreviado e resumido aos tópicos ditos fundamentais. Essa seleção de tópicos de conteúdos para o ensino básico compromete a formação dos cidadãos para o mundo contemporâneo e, por vezes, exclui abordagem de conteúdos da FMC. O fato de um determinado conteúdo não estar no livro adotado para seguir o conteúdo programático não o impede de ser abordado. Então, se os professores não os abordam, estariam eles presos aos livros didáticos do ensino básico?

Levando em consideração que o professor utilize um livro que contenham os conteúdos da FMC. Por quais motivos esses conteúdos não são abordados? Isso, claramente, implica que essa seleção geralmente é feita pelos próprios docentes, muito provavelmente em função de sua má formação profissional. E o que dizem os autores sobre a formação docente?

1.2 O que diz a literatura?

Atualmente, alguns dos principais conhecimentos que envolvem a tecnologia e fenômenos físicos do dia a dia estão no âmbito da FMC. Entretanto, de acordo com Moreira (2018), os conteúdos dessa área de conhecimento são poucos abordados durante a formação dos professores. Os professores de Física “têm pouca Física na graduação, quase nada de Física Moderna e Contemporânea. No seu ensino, não passam da Física clássica, iniciando com a cinemática, na qual os alunos começam a não gostar da Física” (MOREIRA, 2018, p. 76). A consequência disso é que se dá pouca dedicação à FMC e, principalmente, ao contexto histórico.

Uma pesquisa feita por Marques et al (2019, p. 3) indica que apenas dez por cento dos trabalhos publicados entre os anos de 2008 e 2018 são voltados ao ensino da História e Filosofia

da Ciência (HFC). Com isso, vemos que a HFC ainda não tem o espaço que deveria ter no âmbito do ensino e das pesquisas.

A inserção da HFC (História e Filosofia da Ciência) no ensino básico traz uma infinidade de benefícios à aprendizagem, dentre elas a possibilidade de desmitificar a imagem de cientista gênio que permeia o senso comum, mostrando a imagem humanizada do cientista. Outra possibilidade é a abordagem conceitual dentro da história, o que fascina alguns pesquisadores da HFC. Dentre as possibilidades já citadas, o ensino da HFC ainda contribui

para que outros ideais da epistemologia contemporânea possam permear esse espaço educativo, tais como a não linearidade e o papel dos problemas na produção de conhecimentos científicos, a coletividade, a pluralidade metodológica, a divergência de pensamentos, etc (TENFEN; TENFEN, 2017, p. 218).

O contexto da HFC, “por si só, apoiado por distintos referenciais da epistemologia contemporânea pode alavancar incessantes debates em sala de aula sobre a natureza da ciência ou então, [...], sobre os valores associados ao desenvolvimento científico” (TENFEN; TENFEN, 2017, p. 233). Esse tipo de abordagem, além de instigante, permite aguçar os sentidos dos alunos e mostrar que eles também podem ser personagens de um cenário investigativo.

A Física no ensino básico deve, portanto, “ser pensada como um elemento básico para a compreensão e ação no mundo atual, para o entendimento do mundo da Física moderna e contemporânea e para a construção de uma cultura científica do cidadão de hoje” (PIETROCOLA, 2010, p. 7). Partindo desse princípio, os conceitos da FMC devem ser estudados com intuito de serem bases fundamentais para o entendimento de alguns fenômenos naturais e funcionamento de tecnologias modernas. A inclusão desses conteúdos no ensino básico “permitirá uma maior aproximação do jovem à Ciência moderna, [...] e, ainda, possibilitará a esse jovem compreender as discussões sobre os fatos e acontecimentos contemporâneos, divulgados pela mídia” (SIQUEIRA, 2006, p.2).

1.3 A necessidade do estudo conceitual

A construção do conhecimento, por parte do aluno, está comprometida pelas limitações do professor. Essas limitações podem ser ferramentais, didática ou mesmo conceitual. É necessário, portanto, que os professores tenham, ao menos, o domínio conceitual acerca do conteúdo ao qual se sujeitam a lecionar. Para Moreira (2018, p. 76), “a modelagem está na base da Física, conceitos são muito mais importantes do que fórmulas, aprender a perguntar em

Física é mais importante do que saber respostas corretas”. Com efeito, modelar conceitos facilita a compreensão do conteúdo e a interpretação do fenômeno.

Segundo Brasil (2002, p. 23), “[...] o aprendizado de Física tem características específicas que podem favorecer uma construção rica em abstrações e generalizações, tanto de sentido prático como conceitual”. Ainda de acordo com Brasil (2002, p.23), “[...] feitas as investigações, abstrações e generalizações potencializadas pelo saber da Física, em sua dimensão conceitual, o conhecimento volta-se novamente para os fenômenos significativos ou objetos tecnológicos de interesse”. Com isso, o documento indica que a dimensão conceitual é um dos pilares para a construção do conhecimento.

Há, ainda, a preocupação sobre a compreensão ampla dos conceitos, passando pela ideia de multidisciplinaridade. Nesses termos,

[...] o estudo da dinâmica ambiental contribuem outros campos do conhecimento, além da Biologia, como Física, Química, Geografia, História e Filosofia, possibilitando ao aluno relacionar conceitos aprendidos nessas disciplinas, numa conceituação mais ampla de ecossistema (BRASIL, 2002, p. 17).

A partir dessa ideia, outros termos passam a surgir na literatura. Angotti (1993) explicita a ideia de conceitos unificadores que propõe a aproximação das 'várias ciências', (dos cientistas, dos currículos, dos professores, dos alunos) preservando os níveis de formação e cognição. Com isso, há uma preocupação, não apenas com o conceito aplicado na disciplina de Física em si, mas com sua significação global que deve compreender outras áreas de conhecimento.

Os conceitos, enquanto construtos sociais, carregam consigo mais do que apenas significados. Junto ao seu significado, os conceitos carregam o percurso histórico e embates da comunidade científica. Para Angotti (1993, p. 192), "os conceitos são construtos universais da consciência humana sobre 'coisas' do universo - coisas materiais e outras 'coisas', de caráter relativamente permanente". Ainda, de acordo com Angotti (1993, p. 191), "[...] no campo científico/tecnológico, na ausência do objeto concreto, ele (o conceito) estimula e permite ações transformadoras no objeto".

A ideia de proporcionar ‘ações transformadoras’ num objeto ausente é praticada, por exemplo, na FMC onde, muitas vezes, o estudante não tem contato direto com o objeto de estudo para explorá-lo. Todavia, o conceito, enquanto construto da consciência humana, pode proporcionar essa interação.

Um dos conceitos da FMC cujo objeto muitas vezes é manipulado mentalmente é o efeito fotoelétrico, por exemplo. Podemos imaginar, por imediato, fótons sendo emitidos de

uma fonte luminosa colidindo com uma placa metálica e ‘arrancando’ seus elétrons, provocando, assim, a corrente elétrica naquela placa. No decorrer desse processo imaginário, tanto os fótons como os elétrons podem assumir, por exemplo, um formato arredondado em nossas mentes, pois foi dessa forma que nos acostumamos a representá-los. Todavia, quando estudamos conceitos como a dualidade onda-partícula e pacote de energia, nossa concepção sobre os fótons, não mais se resume apenas às bolinhas, mas pode ganhar outros formatos conforme a situação.

Outro fator que nos intriga, neste mesmo fenômeno, é o comportamento da luz até o instante antecedente a colisão com a placa. Até este momento, o aluno pode imaginar que a luz se comporta como onda, mas ao tocar a placa se comporta como partícula. Afinal, uma onda poderia colidir com uma partícula? São concepções que se adequam e podem ser manipuladas de acordo com os conceitos e situações estudadas. Essa manipulação mental do experimento é justamente aquilo que Angotti (1993) propõe com a possibilidade de realizar ações transformadoras num objeto ausente através dos conceitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, tratamos sobre os aspectos histórico, conceitual e fenomenológico do paradoxo de EPR. Além disso, tratamos sobre as ideias filosóficas do círculo de Bakhtin que irão contribuir na especificação ideológica dos discursos envolvidos, trazendo o posicionamento valorativo. Também veremos, conceitualmente, os aspectos da transposição didática que será essencial para a abordagem deste conhecimento com os voluntários.

2.1 O Paradoxo de EPR

Entendemos que a História e Filosofia da Ciência (HFC) é item fundamental em qualquer discussão que envolva qualquer abordagem científica e para mostrar como os acontecimentos científicos se desenvolveram. A contribuição da HFC é crucial para esclarecer características do conhecimento científico e na apresentação de casos exemplares com finalidade de fornecer uma imagem autêntica de como a ciência foi feita (MATHEWS, 1995).

O contexto histórico apresentado mais adiante tem finalidade em dar suporte ao entendimento sobre o contexto em que o paradoxo de EPR se desenvolveu, bem como tem finalidade de facilitar o entendimento conceitual. Tal abordagem da HFC tem a capacidade de promover melhor compreensão conceitual (MATHEWS, 1995). Por estes motivos, veremos, a seguir, um pouco acerca da história do Paradoxo de EPR.

2.1.1 Contextualização histórica

A história da MQ tem sua primeira faísca liberada por Max Planck, já no fim do século XIX, mais precisamente em um trabalho publicado em dezembro de 1900. Planck, então, propôs uma solução para a equação de Wilhelm Wien e atribuiu seu feito a "um ato de desespero". Sua principal conclusão é que os corpos emitem e absorvem luz em quantidades discretas de energia. Neste trabalho, Planck satisfaz a Lei de Wien com a equação

$$\varepsilon = h\nu \tag{01}$$

em que ε corresponde à energia de cada “quanta de luz” (posteriormente conhecidos como “fótons”), h é a constante universal da teoria e ν a frequência do oscilador.

Planck, então, chega à mesma equação encontrada em seu trabalho anterior. Tal conclusão o levou a definir os valores de $h = 6,55 \times 10^{-27}$ erg.s e $k_B = 1,346 \times 10^{-16}$ erg/K (em que h é a constante de Planck e k_B é uma outra constante que consta na equação final encontrada por ele). Além disso, a partir do “número de Loschmidt e o valor conhecido da constante eletroquímica de Faraday, Planck derivou, em 1900, um valor de $e = 4,69 \times 10^{-10}$ E.S.U. para a carga elétrica elementar” (HAAS, 2020, p. 201). Apesar dos esforços de Planck, foi apenas com a publicação de Albert Einstein, em 1905, que o conceito de ‘quanta de luz’ ficou mais conhecido (STUDART, 2000).

A partir de então, as discussões se voltam para o efeito fotoelétrico, que se trata de um fenômeno em que é possível ejetar elétrons de uma placa emitindo luz sobre ela. Então, em 1902, Philipp Lenard publica uma pesquisa em que chega à conclusão que a “velocidade máxima com que os elétrons são ejetados por luz ultravioleta independe da intensidade luminosa” (SOARES, 2016, p. 23). Até então, as discussões estavam consolidadas em torno daquilo que ficou conhecido como o ‘gatilho de Philipp Lenard’, que trata-se da luz incidente no metal necessária para liberar o elétron. Já em 1905, Einstein publica cinco pesquisas na revista *Annalen der Physik*, numa dessas pesquisas ele baseia-se na lei de W. Wien para fundamentar sua teoria do efeito fotoelétrico (SOARES, 2016).

Oito anos mais tarde, em 1913, Niels Bohr aplica as ideias de Planck para o modelo atômico de Ernest Rutherford para explicar as linhas espectrais emitidas pelo átomo de hidrogênio (PESSOA JR, 2006). As inúmeras lacunas deixadas até então só aumentaram a desconfiança em torno da MQ. Esse quadro foi mudando, pois entre os anos 1914 e 1916 Robert Millikan publicou artigos confirmando, com exatidão, a Lei de Einstein para o efeito fotoelétrico (PESSOA JR, 2006). A partir de então, houveram outros acontecimentos em torno da dualidade onda-partícula que exigiam maiores explicações da Física Quântica (FQ), explicações estas que ainda não haviam sido formuladas, bem como dúvidas acerca da causalidade.

Para Einstein, não era uma boa ideia abandonar as teorias pelo fato que elas não respondem completamente as questões da natureza. Em uma das cartas que Einstein trocou com Max Born, o mesmo questiona se

a absorção quântica e a emissão de luz podem ser entendidas no sentido do requisito (*requirement*) de causalidade completa, ou permaneceria um resíduo estatístico? Devo admitir que me falta a coragem de uma convicção. Mas eu ficaria muito infeliz renunciando à causalidade completa (EINSTEIN, 1920, p. 23).

Em complemento à sua ideia, no ano de 1925, Einstein formaria a opinião de que

uma nova teoria quântica satisfatória da matéria teria de fornecer uma descrição causal espaço-temporal, dentro da qual as características corpusculares e ondulatórias aparecessem naturalmente, uma ao lado da outra, de maneira harmoniosa (BROWN, 1981, p. 55)

Ainda na perspectiva de discussão onda-corpúsculo, Bohr se opunha às ideias de Einstein e ao *quantum* de luz se baseando ao fato que “a teoria clássica da radiação explica efeitos ópticos corriqueiros, tais como interferência. Como a natureza discreta da radiação poderia ser reconciliada com tais efeitos?” (BROWN, 1981, p. 56). Assim, a associação da energia de um *quantum* de luz com uma frequência característica parecia autocontraditória e, até, incongruente. Para Bohr, a única chave segura para uma nova Física seria através de seu princípio heurístico de correspondência (BROWN, 1981).

Ainda nesse mesmo ano, 1925, Werner Heisenberg havia notado que as grandezas do mundo atômico não comutam. Os trabalhos lançados em seguida tinham objetivo de trazer explicações matemáticas à teoria quântica voltadas à interpretação da não-comutação de grandezas tidas como relevantes. Seguindo esta tendência, Max Born e Pascual Jordan lançaram as bases da Mecânica Matricial. Com isso, eles mostraram que essas grandezas comportam-se como elementos matriciais. Por sua vez, Paul Dirac, após ler um trabalho de Werner Heisenberg, “estabeleceu um elo de ligação entre a Mecânica Clássica (MC) e a quântica, utilizando um formalismo ‘algébrico’ [...]. Quando publicou seu trabalho em novembro de 1925, parecia que haviam duas novas teorias quânticas, a matricial e a algébrica” (PESSOA JR, 2006, p. 94).

Entretanto, conforme Godoy (2018, p. 3), apenas a partir de 1926 que “a mecânica quântica foi desenvolvida [...], a partir do trabalho seminal de Werner Heisenberg, e independentemente por Erwin Schrödinger”. A interpretação do módulo ao quadrado da função de onda, proposta por Schrödinger, foi dada por Born que a trouxe como uma probabilidade de detectar a partícula em dado espaço. Todavia, apesar da Física Quântica ter se definido em alguns aspectos até 1927, ainda restava uma solução para a interpretação de complementaridade, no que diz respeito ao experimento da fenda dupla. Assim, haviam duas correntes a ser seguidas na época, a de Erwin Schrödinger que trazia $|\psi|^2$ como a densidade de carga elétrica e a ideia de Louis De Broglie que tratava o elétron como partícula que possui uma onda associada. No mesmo ano, Heisenberg mostrou que a observação do fenômeno, através

do experimento, levava a função de onda ψ ao ‘colapso’ e mostrou as relações de incerteza (PESSOA JR, 2006).

Para realizar a observação do fenômeno é necessário um aparato que contenha diafragmas em escala de unidades atômicas. E foi justamente nesse aspecto que Bohr explicou o colapso da função. Para Bohr, “o diafragma tem características quânticas quando faz parte do objeto de medida (*i.e.*, quando se mede o seu movimento de recuo), mas necessariamente tem características clássicas quando faz parte do instrumental (no caso de obter franjas)” (BROWN, 1981, p. 77). Além disso, é necessário levar em consideração que, para qualquer experimento de observação, o observado deve possuir propriedades físicas objetivas e independentes (o que não ocorre em sistemas quânticos). Como a Física clássica satisfaz essa condição de observação, entendeu-se que a linguagem da medição é, essencialmente, clássica (BROWN, 1981).

Ainda sobre o colapso da função de onda, as discussões se aprofundam matematicamente e, no ano de 1927, ocorre a 5ª Conferência de Solvay. Nesta, Dirac citou que “podemos dizer que a natureza escolhe qual dos ψ_n apropriado, uma vez que a única informação que a teoria dá é que a probabilidade de qualquer um dos ψ_n ser escolhido é $|C_n|^2$ ” (tradução própria, SOLVAY, 1928, p. 262).

Ainda em 1927, ano de muitas discussões em torno da dualidade onda-partícula, persistem algumas concepções clássicas de elétron como corpúsculo tais como na fala de Lorentz citando que “para mim, um elétron é um corpúsculo que, em um dado instante, se encontra em um ponto determinado do espaço” (tradução própria, SOLVAY, 1928, p. 248). Notadamente, o discurso ganha uma característica clássica quando Lorentz ainda traz sua concepção de que se “em um momento seguinte esse corpúsculo se encontra em outro lugar, devo pensar em sua trajetória, que é uma linha no espaço” (tradução própria, SOLVAY, 1928, p. 248).

Em outro momento, Lorentz traz um exemplo do encontro do elétron com um átomo no qual, quando o elétron deixa o átomo, há a emissão de um *quantum* de luz. Neste exemplo, sua ideia vai de encontro às palavras de De Broglie que associa uma onda ao elétron (enquanto um corpúsculo). Assim sendo, “é preciso considerar, primeiramente, os sistemas de ondas que correspondam ao elétron e ao átomo antes do choque” (tradução própria, SOLVAY, 1928, p. 249). Essa discussão de Lorentz envolve a questão do determinismo em si, tanto que mais adiante ele questiona se “não se poderia conservar o determinismo fazendo-o o objeto de uma crença?” e se “é necessariamente preciso erigir o indeterminismo como princípio?”.

Ainda na quinta conferência de Solvay, de 1927, Bohr citou que não é possível definir grandezas complementares simultaneamente. Para tal conclusão, foi usado também o argumento que “um objeto quântico não pode ser inteiramente compreendido dentro de um ‘quadro único’, mas necessita de descrições mutuamente excludentes, como ‘onda’ ou ‘partícula’, que juntas se complementam para descrever o objeto” (PESSOA JR, 2006, p. 97).

Neste ano de tantas discussões, Einstein reaparece em cena para atacar o princípio de incerteza, assim como também o fez na conferência de 1930. Sua ideia era violar o princípio de incerteza para energia e tempo. Todavia, em ambas ocasiões, Bohr contra-atacou as tentativas de Einstein. Tal fato, fez com que muitos aderissem à interpretação de complementaridade, também conhecida como a “interpretação ortodoxa” (PESSOA JR, 2006).

Uma outra teoria havia surgido, a TVO (Teoria das Variáveis Ocultas), por Bohm, por sua vez, propunha que cada partícula carregava consigo uma variável “gerada” na sua origem e que a acompanha até o momento da medição. Posteriormente, a TVO foi contestada por Von Neumann em 1932, que mostrou que essa teoria não reproduz todos os resultados da MQ. Mais adiante, essa teoria sofreria outra contestação, feita por John Bell em 1964.

Somente em 1935, que Albert Einstein juntamente com Boris Podolsky e Nathan Rosen questionaram mais ofensivamente se a descrição de realidade apresentada pela Teoria Quântica poderia ser considerada completa. Para isso, usaram argumentos da própria MQ que envolviam conceitos filosóficos de completude, realismo e uma interpretação do princípio de incerteza. Tais argumentos convergem para um experimento mental que foi redesenhado por David Bohm (1952) e que mostramos no tópico sobre os aspectos teóricos do paradoxo de EPR, nesta pesquisa.

O artigo publicado por EPR foi intitulado como “*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*”. Esse artigo questionou se a descrição da realidade física apresentada pela MQ poderia ser considerada completa. Para levantar esse questionamento, eles utilizaram argumentos matemáticos da própria MQ e de um experimento mental. Os autores propuseram dois sistemas, I e II, separados espacialmente e que interagiram no passado. “O estado do sistema composto I+II seja tal que o resultado de uma possível medida de posição em I permitisse inferir a posição precisa de II” (BROWN, 1981, p. 71). Essa consideração também deve ser válida também para o momento dos dois sistemas. Um dos grandes problemas é o intitulado colapso da função de onda que os força a escolher a medição da posição ou do momento de I. A consequência imediata é a escolha da medida que se quer fazer em II, o que demonstra, para EPR, a incompleta descrição de realidade apresentada pela teoria (BROWN, 1981).

Complementando seu argumento, EPR ainda traz um condição para a existência de um elemento na realidade física. A condição cita que existem elementos simultâneos associados à posição e ao momento nos dois sistemas e que uma ação do experimentalista não pode implicar na decisão de livre escolha do sistema observado, do contrário isso implicaria numa ação-à-distância entre os sistemas (BROWN, 1981). Esse tipo de ação não é uma definição aceitável pelos os autores. Assim, EPR contestou a linha de pensamento ortodoxa defendida por Bohr.

Bohr também publica um artigo com mesmo título em resposta à EPR, mas seus argumentos não convenceram a comunidade científica. Isso se deu porque Bohr já estava imerso num processo de mudança de pensamento, o que o levou a ser confuso e inconsistente ou, talvez, mal compreendido. Essencialmente, Bohr ataca aquilo que chamou de ambiguidade no critério de realidade física formulado por EPR e completa citando que a "descrição oferecida pela mecânica quântica para os fenômenos físicos se mostra capaz de preencher, em seu âmbito, todas as exigências racionais de completude" (BOHR, 1935, p. 696).

Ao fim de seu artigo, Bohr ainda menciona a teoria da relatividade (proposta por Einstein) para esclarecer as semelhanças em relação a posição dos instrumentos de medição utilizados em ambas teorias e conclui que

a dependência das leituras de escalas e relógios no sistema de referência, na teoria da relatividade, pode até mesmo ser comprada com a troca essencialmente incontrolável de quantidade de momento ou energia entre os objetos das medidas e todos os instrumentos que definem o sistema de referência espaço-tempo, que, na teoria quântica, nos confronta com a situação caracterizada pela noção de complementaridade (BOHR, 1935, p. 702).

Com isso, Bohr finaliza afirmando a necessidade de mudança de atitude perante essa nova característica filosófica do conceito de realidade física. Todavia, suas conclusões deixaram a desejar e uma resposta concreta só foi dada em 1964 por John Stewart Bell em um artigo matematicamente detalhado, que ficou conhecido como o Teorema de Bell ou, ainda, Desigualdade de Bell.

A desigualdade de Bell mostrou que ao envolver “grandezas mensuráveis para pares colecionados de partículas [...], seria obedecida por qualquer TVO (Teoria das Variáveis Ocultas) local, mas que seria violada pela Teoria Quântica” (PESSOA JR, 2006, p. 102). Os experimentos feitos na mesma década mostraram justamente que a teoria das variáveis ocultas locais está incorreta e a desigualdade de Bell é violada.

A conclusão que se chegou na época é que é necessário rejeitar o realismo ou a localidade. Pessoa Jr. (2006, p. 102) ainda nos lembra dos termos da teoria de David Bohm, ao

citar que “se quisermos que a Teoria Quântica descreva a realidade que jaz para além das observações, teremos que abandonar a localidade. Só ao preço de abandonar o realismo poderíamos manter a tese da localidade”.

Até então vimos o desenrolar da história até o lançamento do Paradoxo de EPR e, nesse meio termo, vimos conceitos e aspectos teóricos que precisam ser melhor debruçados para uma compreensão do tema. Vejamos então alguns destes aspectos à seguir.

2.1.2 Aspectos teóricos do paradoxo de EPR

Após todas as discussões em volta da MQ envolvendo a ausência de aspectos determinísticos da natureza em função da não-comutatividade entre duas quantidades físicas A e B, EPR (1935, p. 778) se propuseram a questionar a MQ. Para tal feito, eles seguiram duas hipóteses: “(1) a descrição da realidade quântica dada pela função de onda não é completa ou (2) quando os operadores correspondentes às duas quantidades físicas não comutam, estas não podem ter realidades simultâneas”. Tais hipóteses foram baseadas no princípio da incerteza, cujo conceito veremos a seguir.

2.1.2.1 O princípio da incerteza

Desenvolvido por Heisenberg, em 1927, o princípio da incerteza nos diz que “em um sistema quântico não é possível prever o valor exato para duas grandezas físicas cujos operadores não comutam entre si” (GODOY, 2018, p. 6). Algumas interpretações sobre este princípio são trazidas por Godoy (2018), mas apenas uma se encaixa no argumento de EPR.

A interpretação dada ao princípio de incerteza, que se encaixa no argumento de EPR, segue conforme a chamada versão forte do princípio da incerteza em que “quando se conhece a quantidade de movimento de uma partícula, sua coordenada não tem realidade física”. Isso corresponde, portanto, com a seguinte versão de interpretação: “se a grandeza física S_x tiver valor bem definido, então a grandeza física incompatível S_z não tem realidade física” (GODOY, 2018, p. 12).

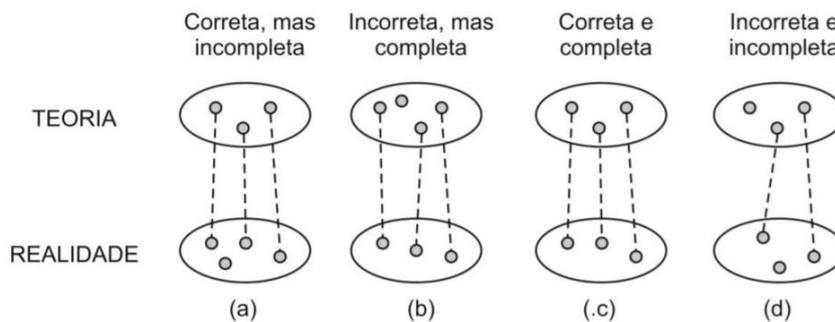
Para entendermos os argumentos de EPR, precisamos, ainda, entender os conceitos de completude e realismo, conforme veremos a seguir.

2.1.2.2 Concepções de Completude e Realismo para EPR

Para entendermos os argumentos de EPR, vamos necessitar de dois critérios para compreensão da incompletude dentro dessa discussão. Um desses critérios é chamado de condição de completude e cita que, para considerarmos uma teoria completa, “todo elemento da realidade física precisa ter um correspondente na teoria física” (EPR, 1935, p. 777).

Por outro lado, EPR (1935, p. 777) ainda refere-se ao critério de realidade em que propõe que “se, sem de modo algum perturbar um sistema, pudermos prever com certeza (ou seja, com probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondente a essa quantidade física”. Abaixo podemos ver um diagrama que explicita como se dá a relação entre elementos de uma teoria física e a realidade, bem como as concepções de completude da teoria.

Figura 02 - Diagramas de completude e correção de teorias



Fonte: Godoy, 2018, p. 15

Conforme a Figura 02, apenas o exemplo (c) obedece os critérios propostos por EPR. Neste exemplo, os dois critérios supracitados para completude e realismo são obedecidos e, logo, tal teoria seria considerada correta e completa, pois cada elemento da teoria possui um correspondente físico na realidade. Vejamos então os argumentos de EPR sobre a completude.

2.1.2.3 Argumentos de EPR

Caso a função de onda fornecesse uma descrição completa da realidade (se os operadores comutassem na linguagem matemática), a condição de completude seria satisfeita, mas isto não ocorre, resta que as hipóteses dadas sejam testadas. Para isso, é levado em conta que a MQ faz uso da função de onda para descrever completamente a realidade física do sistema

correspondente. Entretanto, tal afirmação leva à contradição conforme explicação a seguir em que contempla dois sistemas.

A grande sacada teórica de EPR está na proposta de dois sistemas, I e II, os quais interagem entre si entre os tempos $t = 0$ e $t = T$. Os estados de ambos sistemas já são conhecidos antes do tempo $t = 0$ e o estado da combinação de I+II pode ser calculado com a equação de Schrödinger a qualquer instante seguinte. Conforme EPR (1935, p. 779), “não podemos, no entanto, calcular o estado em qualquer um dos sistemas após a interação”. Para isso, é necessário fazer uso de medidas em um processo de “redução do pacote de onda”.

Para melhor explicar como isso ocorre, pensemos no fato que se uma quantidade A é medida, encontramos então o valor a_k e o primeiro sistema tem estado definido por uma função de onda. Por consequência, o segundo sistema também tem o seu estado definido. Para EPR (1935), é assim que ocorre o processo de redução do pacote de onda.

De forma análoga, se a quantidade B for medida, e obtivermos o valor b_r , então concluímos que, após a medida, o primeiro sistema é deixado no estado definido por uma função de onda. Neste caso, havendo duas medidas distintas no primeiro sistema, isso faz com que o segundo sistema fique no estado com duas funções de ondas distintas. Devemos levar em conta, também, que no momento da medida não há interações entre os sistemas e qualquer alteração em um dos sistemas não deve interferir no outro. Logo, “é possível atribuir duas funções de onda diferentes [...] para a mesma realidade (o segundo sistema após a interação com o primeiro)” (tradução própria, EPR, 1935, p. 779).

EPR (1935) mostram que as funções de ondas dos dois sistemas podem ser autofunções de dois operadores não comutativos correspondentes à uma quantidade física P e Q, respectivamente. A equação final equivalente a esta interpretação, pode ser dada por

$$PQ - QP = \frac{h}{2\pi i} \quad (02)$$

onde h é a constante de Planck. De fato, $PQ \neq QP$, não comutam. Com isto, os operadores correspondentes às duas quantidades físicas não comutam e, conseqüentemente, levam a conclusão que podem ter realidades simultâneas.

Voltando às hipóteses propostas inicialmente, vemos que a negação de (2), sobre simultaneidade de realidades, leva à aceitação de (1). Deste modo, EPR (1935, p. 780) concluem que “a descrição quântica da realidade física dada pela função de onda não é completa”. Entretanto, deixam em aberto se existe ou não uma descrição plausível e afirmam

acreditar que uma delas seja possível. Para entendermos de forma experimental, veremos à seguir a interpretação de David Bohm para o experimento mental de EPR.

2.1.3 O experimento mental

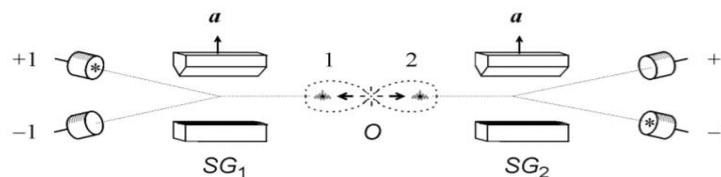
O experimento mental de EPR consiste em duas variáveis cuja soma dos seus momentos, $p = p_1 + p_2$, comuta com a diferença de suas posições, $\xi = x_1 - x_2$. Todavia, dado a função de onda

$$\Psi = \delta(x_1 - x_2 - a), \quad (03)$$

os valores de $p_1 - p_2$ e $x_1 + x_2$ não podem ser determinados (BOHM, 1952).

Neste experimento, apenas uma das grandezas, a posição ou o momento, podem ser determinadas. Caso seja obtido o valor de posição x_1 para a primeira partícula, será possível obter o valor x_2 para a segunda partícula, mas perderá a possibilidade de se obter o momento de ambas. De forma análoga, é possível obter os valores de momento das partículas, mas não é possível obter os valores de posição das mesmas, conforme Bohm (1952). Essa anti-correlação pode ser observada na figura a seguir.

Figura 03 - Estado de singleto de duas partículas de spin 1/2, apresentando anti-correlação perfeita.



Fonte: Pessoa Jr. (2006, p. 99)

Na figura 03, podemos ver que um par de partículas são emitidas na mesma direção, em sentidos opostos e cada uma passa por um par de ímãs (detectores). Estes ímãs permitem a medição do momento angular de cada partícula (o qual é chamado de spin). As partículas, por sua vez, são emitidas no estado singleto. Pessoa Jr (2006) define o estado de singleto com a seguinte propriedade

se medirmos o spin na direção a da partícula nº 1 e obtivermos o valor +1 (ou seja, o componente de spin foi encontrado apontando no sentido $+a$, e não no sentido $-a$),

então se medirmos o spin na direção a da partícula nº 2, com certeza obteremos o valor -1 . Tal propriedade é conhecida como anti-correlação perfeita. (PESSOA JR, 2006, p. 99).

O grande problema da questão é que se medirmos o spin da partícula 1, instantaneamente a outra partícula ganha seu estado oposto. Desta forma, não importa o quão distante as partículas estejam, isto sempre ocorrerá. O fato ocorrido viola o princípio da localidade, o qual consiste no fato que “não pode ocorrer nenhuma mudança real no segundo sistema como decorrência de qualquer coisa que se faça no primeiro” (tradução própria, EPR, 1935, p. 779), bem como viola o conceito de realismo conforme mostrado no tópico anterior.

Fica intrínseco ao discurso de EPR, o fato que o experimento exposto contém um paradoxo pelo fato que nada pode ser mais rápido que a luz, conforme a teoria da relatividade. Neste momento, fica evidente a existência de uma MQ que se opõe a algumas das concepções quânticas previamente comprovadas no decorrer da história da ciência.

À seguir, veremos as contribuições filosóficas do círculo de Bakhtin e como classificamos o discurso de EPR.

2.2 As contribuições filosóficas do Círculo de Bakhtin

O Círculo de Bakhtin é um grupo formado por intelectuais das mais diversas áreas de conhecimento. Todavia, convergimos para as ideias de Mikhail M. Bakhtin, Valentin N. Voloshinov e Pavel N. Medvedev. Neste sentido, ao nos referirmos ao Círculo de Bakhtin, estaremos nos referindo às concepções destes autores, muito embora seja importante deixar claro que o círculo não se resume apenas aos três citados.

Usaremos algumas ideias do Círculo de Bakhtin para auxiliar o entendimento da perspectiva filosófica contida nos discursos de EPR. Não temos, portanto, a intenção de usar essas ideias como um “método” de análise, pois seria um equívoco fazer isso. Nesses tempos de colonização científica, “é compreensível que muitos vão aos textos de Bakhtin (e do Círculo) em busca precisamente de método [...]. O resultado mais visível desse equívoco [...] é transformar categorias filosóficas em categorias científicas, em categorias de método” (FARACO, 2009, p. 39). Neste sentido, seria inviável buscar um método de análise de discurso com base nas ideias do Círculo de Bakhtin.

Para uma análise que transcende a linguística, Faraco (2009, p. 22) traz algumas coordenadas, dentre elas, “[...] a unicidade do Ser e do evento (e a conseqüente necessidade de não separar o mundo da teoria do mundo da vida), a relação eu/outro e a dimensão axiológica

[...]”. Veja que, neste ponto, há uma convergência de pensamento filosófico com o discurso de EPR ao questionar a teoria da MQ. EPR claramente deseja que uma teoria, para ser considerada completa, tenha seu correspondente teórico na realidade física.

Por sua vez, o posicionamento social valorativo (que chamaremos de posicionamento sócio científico) é o que se pode chamar, à grosso modo, de “opinião formal”, um posicionamento social que contém valores. Portanto, se um indivíduo incorpora o discurso de outrem e este outrem é um cientista, chamaremos isso de posicionamento sócio científico. Tal posicionamento é comumente expresso nos enunciados que normalmente possuem uma dimensão avaliativa (FARACO, 2009).

Os discursos de EPR incorporam discursos de vários cientistas da época, inclusive de opositores com objetivo de reforçar seus argumentos e contestar a completude da MQ. Algumas dessas ideias implícitas no discurso de EPR são dadas por Heisenberg ao mostrar a não-comutatividade de grandezas quânticas, a própria concepção de seu principal opositor, Bohr, quando cita que não é possível definir grandezas complementares simultaneamente. Até mesmo apoios intrínsecos tais como os de Max Born e Pascual Jordan e as contribuições de Dirac que propuseram visões diferentes do formalismo quântico, como se houvessem duas teorias quânticas.

Ao incorporar argumentos de seus próprios opositores e, trazendo as concepções dadas até o momento sobre complementaridade, realismo e princípio da incerteza, EPR consegue mostrar à comunidade científica seu ponto de vista com êxito. Até então vimos o conjunto de vozes que incorpora o posicionamento valorativo social de EPR, mas devemos nos atentar para não confundir posicionamento social com a ideologia.

Ideologia para o Círculo de Bakhtin será, então, “o universo que engloba a arte, a ciência, a filosofia, o direito, a religião, a ética, a política, ou seja, todas as manifestações superestruturais” (FARACO, 2009, p. 46). Em um sentido mais restrito temos o posicionamento social valorativo, enquanto em um sentido amplo temos a ideologia.

Por diversas vezes, Einstein faz afirmações e questionamentos com objetivo de demonstrar que todo o estudo da MQ não condiz com a realidade. Uma de suas afirmações mais conhecidas é que “Deus não joga dados com o universo”, em alusão ao modelo de proposição de probabilística da MQ. Para Einstein, a partícula possui propriedades pré-definidas. Com isso, o discurso de EPR está impermeado ideologicamente pelo sentimento de fé, em acreditar que algo ocorre porque foi concebido divinamente daquela forma.

Um outro aspecto que pode ser observado é a dialogização que é, para Bakhtin, o encontro sociocultural das vozes e a dinâmica que as estabelecem. São vozes que se apoiam, se

contrapõem, se diluem, se arremedam, polemizam, etc. No contexto histórico acerca da MQ até o lançamento do Paradoxo de EPR, é possível identificar várias dessas vozes. A dialogização ocorre seja na convergência ou divergência de pensamentos. Um desses encontros ocorre quando a versão forte do princípio da incerteza é identificada dentro dos argumentos de EPR. À todo momento, há convergências e divergências, mas principalmente citações. As citações ocorreram tanto nas conferências como nas pesquisas publicadas principalmente por Bohr e Einstein, caracterizando a dialogização.

Vamos, a seguir, discutir sobre a transposição didática de conteúdos e como foi feita a abordagem deste tema com os voluntários.

2.3 Transposição Didática

A ideia de transposição didática traz consigo a necessidade de incorporar o conteúdo como objeto de ensino. O conteúdo, enquanto objeto de uma transposição didática, deve ir do saber sábio para o saber a ensinar, em seguida tornar-se o saber ensinado. Na interpretação de Chevallard (1991),

um conteúdo de saber que tenha sido definido como saber a ensinar sofre, a partir de então, um conjunto de transformações adaptativas que irão torná-lo apto a ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O “trabalho” que transforma um objeto de saber a ensinar em um objeto de ensino, é chamado de transposição didática (CHEVALLARD, 1991, p. 45).

Nesta interpretação, o saber sábio é aquele saber construído, pesquisado e legitimado pela comunidade científica. Enquanto o saber a ensinar, conforme Oliveira (2013), depende de alguns fatores, sendo a criatividade do professor (para executar as ações baseadas nos materiais de apoio) o fator preponderante na execução desse saber, tais como programas e livros didáticos. Por sua vez, o saber ensinado é aquele em que o professor têm aplicado conforme o saber sábio e os interesses da sociedade e comunidade pedagógica, é o saber que é aplicado em sala de aula. Em suma, Chevallard (1991) ainda traz uma observação, citando que

[...] O saber tal como é ensinado, o saber ensinado, é necessariamente diferente do saber inicialmente designado como o que deve ser ensinado e do saber a ensinar. Este é o terrível segredo que o conceito de transposição didática põe em perigo. [...] (CHEVALLARD, 1991, p. 17).

Um resumo dessa teoria é apresentado na figura a seguir. Nota-se a presença ainda da noosfera que vem a englobar o sistema de ensino, a modificação do saber sábio objetivando atender as necessidades e o contexto em que será trabalhado (OLIVEIRA, 2013). Por fim, podemos entender a transposição didática conforme a figura 01.

Figura 01 – Transposição Didática



Fonte: Oliveira (2013, p. 132)

Dessa forma, aplicaremos a transposição didática com auxílio de tecnologias para apresentação do conteúdo em *slides* (Apêndice C). No decorrer da apresentação, fizemos constantes menções aos acontecimentos históricos e questionamentos que permitam os voluntários a se manifestarem, pois, dessa forma, também poderemos coletar discursos.

Além disso, fizemos a abordagem de um pequeno vídeo explicativo sobre o entrelaçamento quântico explicado¹. Além desse vídeo, foi feito uma abordagem com o experimento virtual do interferômetro de Mach-Zehnder que trata-se de um experimento proposto com objetivo de investigar o atributo posição do fóton e analisar como o mesmo deve ser tratado (onda ou partícula).

Ao esboçar o material a ser apresentado, tivemos alguns cuidados para evitar a assimilação de conteúdos da MQ com os da MC e quando o fizemos deixamos claro as concepções quântica e clássica. Outro fator que tivemos de ter cuidado é pelo fato que a transposição didática dos conteúdos da MQ é tido como “uma tarefa das mais complexas”, uma vez que:

De um lado têm-se as exigências epistemológicas inerentes ao campo de conhecimento produzido pela Física Moderna, muito distantes dos padrões de entendimento forjados no mundo cotidiano. Por outro lado, as exigências do domínio escolar não são menores; Ideologia, necessidades de natureza didática e tradição se entrelaçam na constituição de um domínio particular (PIETROCOLA, 2010, p. 30).

¹ LOOS, P. **O entrelaçamento quântico explicado**. Youtube. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Q9J4ArjheD8>>. Acesso em: 10 de dez. 2020.

Optamos por evitar a abordagem conceitual detalhista da matemática presente no assunto, uma vez que muitos dos voluntários já haviam terminado suas licenciaturas há certo tempo e, portanto, tivemos o respeito em preservar abordagens não detalhistas da matemática. Seria necessário bem mais que um encontro para rememorar os aspectos matemáticos, mas, apesar dessa limitação, o aspecto teórico deverá ser abordado com os voluntários.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Fizemos o levantamento de livros, artigos, dissertações e documentos legais, que mostram a necessidade da FMC em ser abordada no ensino básico, bem como deram aporte à todo arcabouço teórico de nossa pesquisa. Com tal levantamento, foi feita a triagem dos materiais mais relevantes, restando apenas os referenciados nesta pesquisa.

3.1 Descrição e tipologia da pesquisa

A tipologia desta pesquisa tem cunho qualitativo, uma vez que buscaremos compreender uma situação específica apresentada por voluntários. De acordo com Richardson (2015, p. 90), a pesquisa qualitativa se caracteriza “como a tentativa de uma compreensão detalhada dos significados e características situacionais apresentadas pelos entrevistados, em lugar da produção de medidas quantitativas de características ou comportamentos”.

Além disso, nossa pesquisa tem caráter exploratório, pois desejamos entender minuciosamente o discurso do pensamento coletivo dos professores selecionados. Para Fiorentini e Lorenzato (2007),

[...] uma pesquisa é exploratória ou diagnóstica quando o pesquisador, diante de uma problemática ou temática ainda pouco definida e conhecida, resolve realizar um estudo com o intuito de obter informações ou dados mais esclarecedores e consistentes sobre ela (FIORENTINI; LORENZATO, 2007, p. 69).

Portanto, buscaremos entender as concepções dos professores de Física acerca do paradoxo de EPR. Neste sentido, nossa pesquisa tem, também, o propósito de fazer um estudo de caso. Para Godoy (1995, p. 25), o estudo de caso “se caracteriza como um tipo de pesquisa cujo objeto é uma unidade que se analisa profundamente”. Além disso, o autor ainda cita que esse tipo de pesquisa “tem por objetivo proporcionar vivência de realidade por meio da discussão, análise e tentativa de solução de um problema extraído da vida real”. Esta definição vai de encontro ao que diz Yin (2010) ao citar que:

O estudo de caso permite que os investigadores retenham as características holísticas e significativas dos eventos da vida real – como os ciclos individuais da vida, o comportamento dos pequenos grupos, os processos organizacionais e administrativos, o desempenho escolar, e as relações internacionais. (YIN, 2010, p. 21).

Dessa forma, nossa pesquisa se trata de um estudo de caso, pois exploramos o tema e a descrição do sujeito de pesquisa no próprio questionário aberto.

3.2 O sujeito da pesquisa

Convidamos um grupo de professores de Física para compor o voluntariado desta pesquisa. Foram feitos convites a dez professores de Física, dos quais nove aceitaram o convite para participar da pesquisa, mas somente seis puderam participar em decorrência de divergência de disponibilidades de horários. Para realizarmos os convites, levamos em conta três critérios para a seleção dos professores: que o convidado tivesse concluído a licenciatura em Física, que tivesse acesso às ferramentas necessárias para os encontros remotos e disponibilidade de horários.

A escolha por um pequeno número de voluntários se deu em função pelo fato que iremos trabalhar com discursos em questionário aberto. Esse tipo de ferramenta possibilita discursos de complexidades e extensões que podem ir além do esperado. Além disso, não é necessário extrairmos uma grande quantidade de voluntários para coletarmos um discurso coletivo. Conforme Lefevre e Lefevre (2005, p. 18), o discurso/opinião coletivo(a) pode ser gerado(a) “no pequeno grupo, na medida em que esse grupo é socialmente estratificado, isso é, composto com os tipos de indivíduos pertinentes ao tema pesquisado”, em nosso caso, professores licenciados em Física.

Por fim, frisamos que não haverá a identificação dos voluntários de acordo com seus nomes. A única identificação de cada voluntário será visualizada por meio de siglas, Voluntário A (V_A), Voluntário B (V_B), Voluntário C (V_C), Voluntário D (V_D), Voluntário E (V_E) e Voluntário F (V_F). Vejamos então outros aspectos da aplicação desta pesquisa.

3.3 Aspectos da aplicação da pesquisa

Em função do momento de pandemia vivido em todo o mundo no momento em que esta pesquisa esteve em desenvolvimento, várias atividades profissionais tiveram de se readaptar para permanecerem ativas. Com a área da educação não foi diferente, sendo necessário recorrer aos recursos digitais como ferramenta intermediadora do conhecimento. Por este motivo, optamos por encontros remotos com os professores voluntários.

3.3.1 Ensino Remoto

Não é nossa intenção prolongar discussões sobre EaD (Ensino à Distância) ou ensino remoto, mas demonstrar sua possibilidade para embasar a necessidade que tivemos em propor encontros remotos à distância. Se tivermos tais recursos, em uma época que exige o ‘distanciamento social’², porque não usá-los?

Justamente buscando preservar o distanciamento social que foi proposto encontros remotos, através de dispositivos tecnológicos com acesso à *internet* e um aplicativo dedicado à fazer reuniões *online* (Google Meet). Seguindo esta tendência, Ludovico et al (2020, p. 60) afirma que “[...] parte da população continua tendo contatos por meio de mídias sociais e de diferentes Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) já utilizadas anteriormente [...]”. Tais ferramentas ganharam foco na nova realidade vivida em todo o mundo, principalmente no setor educacional.

Nessa perspectiva, os encontros de nossa pesquisa foram contemplados de forma remota tanto para a coleta de dados como para a aplicação da abordagem do conteúdo. Vejamos então como se deu a coleta de dados.

3.3.2 A coleta de dados

Serão feitos três encontros remotos com os professores voluntários e aplicados dois questionários abertos. Para Gil (2008), o questionário pode ser classificado como aberto ou fechado. O questionário do tipo aberto contém perguntas que permite o entrevistado dar respostas livremente e o questionário do tipo fechado se caracteriza por conter alternativas a ser escolhidas pelo informante. Assim, optamos pelo questionário aberto, pois acreditamos que este nos fornecerá os discursos sem a influência de opções. Ainda poderemos categorizar os discursos para, posteriormente, reformularmos num Discurso do Sujeito Coletivo (DSC) conforme os critérios de elaboração fornecidos por Lefevre e Lefevre (2005).

Optamos por analisar os discursos por meio da DSC pelo fato que pretendemos compreender as concepções dos professores de Física acerca do paradoxo de EPR e não avaliar o que está “correto” ou “errado” nestes discursos. A técnica de análise de discurso permite que possamos traçar um discurso que represente o pensamento geral do pensamento do grupo

² Distanciamento social pode ser entendido como o distanciamento físico entre as pessoas. Esta foi uma das medidas tomadas por vários governos com o objetivo de tentar impedir o aumento exponencial dos casos de Covid-19 (doença causada pelo coronavírus e seus variantes) durante os anos de 2020 a 2022.

selecionado. Deixamos claro que esse pensamento não representa o todo, mas a parcela selecionada e que, sim, pode indicar um caminho pelo qual o pensamento da coletividade geral está se direcionando. Dessa forma, serão realizados 3 (três) encontros, sendo estes apresentados da seguinte maneira:

Quadro 01 – Relação de atividades e propósitos

	Atividade realizada	Objetivo
1º Encontro	Pré-teste: Proposta de resolução do questionário com as questões abertas.	Conhecer os docentes e levantar as concepções dos mesmos sobre os contextos histórico, teórico e fenomenológico do paradoxo de EPR.
2º Encontro	Apresentação do paradoxo de EPR (aspectos históricos, conceituais e fenomenológicos com uso do experimento virtual de Mach-Zehnder ³).	Rememorar o conteúdo naqueles que já o conhecem formalmente; Despertar a participação dos voluntários tendo em vista a manifestação de conhecimentos não expressos no primeiro encontro.
3º Encontro	Pós-teste: Proposta de resolução do questionário incluindo três questões anteriormente aplicadas.	Realizar o levantamento geral das concepções após o cumprimento da abordagem do conteúdo.

Fonte: feito pelo próprio autor

Conforme visto no Quadro 01, a pesquisa foi aplicada em três encontros e a principal ferramenta para levantamento de dados serão os questionários abertos. Vejamos então quais questionamentos fazem parte destes questionários.

3.3.3 Levantamento das concepções

Para o primeiro e terceiro momento, foi feita a sondagem dos voluntários acerca de seus percursos acadêmicos e profissional, bem como envolvendo questões acerca dos três contextos que envolvem o paradoxo de EPR, histórico, conceitual e fenomenológico. Assim, tivemos a preferência de realizar um questionário aberto por algumas razões, dentre elas a possibilidade de captar as concepções prévias dos voluntários tais qual como se encontra em sua mente. Dessa forma, nosso questionário do primeiro encontro contemplou as seguintes questões:

³ OSTERMANN, F. *Interferômetro de Mach-Zehnder*. Instituto de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda/>. Acesso em: 09 mar 2022.

- 1) Além da licenciatura em Física, você possui mais alguma graduação (concluída ou em andamento)? Se sim, qual a área de formação?
- 2) Você possui algum curso de pós-graduação (concluído ou em andamento)? Se sim, qual a área de formação?
- 3) Por estimativa, qual o seu tempo de experiência como professor no ensino básico?
- 4) Você já lecionou conteúdos pertencentes à Física Moderna e Contemporânea no ensino básico? Se sim, qual(is)? E quais as principais dificuldades encontradas? Se não, por qual(is) motivo(s)?
- 5) Você estudou sobre o paradoxo de EPR em sua licenciatura?
- 6) Numa escala de 0 a 10, o quão você conseguiu compreender a disciplina de Mecânica Quântica em sua licenciatura? Você acredita que sua compreensão sobre o assunto possa influenciar na sua prática docente acerca do conteúdo?
- 7) A Física Moderna é uma área do conhecimento relativamente nova e teve seus primeiros acontecimentos no final do século XIX. Muitos dos acontecimentos ocorridos nas três primeiras décadas do século seguinte foram fundamentais para levar Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) a questionarem a descrição fornecida pela Mecânica Quântica. O questionamento feito por EPR foi impactante e permaneceu por décadas sem uma resolução cientificamente aceitável. Descreva, de forma concisa, o contexto histórico em que o questionamento foi feito;
- 8) “Deus não joga dados com o Universo” e “você realmente acredita que a Lua só existe quando olhamos para ela?”, foram as citações mais marcantes de Einstein ao questionar a ‘completude’ da Mecânica Quântica. Talvez o grande receio de Einstein sempre tenha sido o fato de haver uma teoria consistente que fosse à contramão de sua teoria da relatividade. De que forma a interação a longas distâncias entre partículas poderia se contrapor à teoria da relatividade? O que leva EPR a questionar se a descrição da realidade física apresentada pela MQ está completa? (Expresse sua resposta dentro do contexto teórico/conceitual do Paradoxo de EPR);

9) Descreva, de forma objetiva, um experimento que melhor traduz o paradoxo e/ou experimento mental proposto por EPR.

Conforme visto, as seis primeiras questões denotam nossa preocupação em descrever quem são estes voluntários, enquanto as perguntas 7, 8 e 9 (do primeiro encontro) dizem respeito ao conteúdo necessário para aplicação de nossa metodologia de análise de discurso, o paradoxo de EPR. Já em nosso segundo questionário, repetimos as questões 7, 8 e 9 do questionário anterior, sendo chamadas de 1, 2 e 3, respectivamente, e adicionamos as seguintes questões a seguir:

4) Em sua opinião, esse tema é relevante para a formação crítica do cidadão?

5) Nas suas próximas práticas docente, você pretende abordar os conteúdos da FMC com seus alunos?

Nestes questionamentos, 4 e 5, denotamos nossa necessidade em saber a opinião acerca do tema e as futuras práticas docentes dos voluntários. Após a coleta de dados, foi feita uma análise de discurso à luz da DSC de Lefevre e Lefevre (2005). Cabe frisarmos que aplicaremos o DSC apenas nas questões 7, 8 e 9 (para o primeiro encontro) e questões 1, 2 e 3 (para o terceiro encontro) que são as questões referentes ao paradoxo de EPR.

3.3.4 O Discurso do Sujeito Coletivo: DSC

Quando um indivíduo se expressa sobre algo, ao mesmo tempo em que expressa seu pensamento individual, expressa também um pouco do pensamento coletivo. Quando este indivíduo sinaliza expressões como “‘eu penso que’, ‘minha opinião é que’, esse indivíduo já é, na realidade, do ponto de vista sociológico, o que podemos chamar de ‘eu social ou coletivo inconsciente’” (LEFEVRE; LEFEVRE, 2005).

Aplicaremos a metodologia do DSC com objetivo de traçar o discurso coletivo que melhor condiz com as concepções dos voluntários acerca do assunto e, assim, formalizar cientificamente as concepções expressas, uma vez que o objetivo da DSC é justamente resgatar o “eu social ou coletivo”.

Devemos nos atentar ao fato que os discursos em pesquisas são normalmente expressos sem formalidade e, como tal, possui características singulares como interrupções, saltos e, até mesmo, retomada à algo anteriormente citado através de expressões como “‘isso” ou “ele””. Por este motivo não devemos fazer análise de frases isoladas, mas sim do todo (dentro do contexto do tema abordado), obviamente sem descartar o sentido ou significado das unidades constituintes. Assim, aplicaremos o DSC fazendo a categorização e observando o conteúdo dos discursos para que não haja distorção do discurso do sujeito coletivo.

3.3.4.1 O discurso do sujeito coletivo: categorização

Em si tratando de discurso, o coletivo é a soma dos iguais. Quando se trata de questionários abertos é necessário utilizar o processo de categorização de respostas julgadas iguais ou equalizáveis (LEFEVRE; LEFEVRE, 2005). Vale ressaltar que um pequeno grupo não é uma coletividade e nem pode representá-la em sua totalidade. Cada discurso pode ser analisado e categorizado por quatro operadores, são eles:

- Expressões-chave (E-ch): são trechos objetivos que rapidamente resumem o que se quer dizer no discurso.
- Ideias Centrais (ICs): é a formulação que melhor descreve o sentido de cada discurso.
- Ancoragem (ACs): é a formulação que descreve a ideologia de cada discurso.
- Discursos do Sujeito Coletivo (DSCs): são os discursos que melhor representam os discursos daquele grupo de indivíduos.

Para que uma opinião coletiva permaneça coletiva, é preciso “ser somada indutivamente e ver preservada, no produto final, na natureza discursiva” (LEFEVRE; LEFEVRE, 2005). Isso é possível agrupando as categorias e o conteúdo das respostas individuais. Com isso, podem ocorrer, em alguns momentos, a soma de discursos de categorias distintas.

A análise de um discurso, no entanto, não deve contemplar apenas a translinguística (disciplina que se ocupa da enunciação e seus aspectos), mas também deve se apoiar na linguística (que deve contemplar os aspectos gramaticais e de sentido em enunciados curtos), por este motivo trouxemos as ideias de Lefevre e Lefevre (2005) para análise e categorização de discursos dos voluntários. As categorias foram definidas conforme a análise de discurso e buscam semelhanças nos discursos expressos.

Entender como esses discursos se desenrolam e suas bases é essencial, no entanto, ao analisar esses discursos, não buscamos identificar trechos de assimilação às palavras expressas em publicações científicas ou, muito menos, como expressas na apresentação do conteúdo durante o segundo encontro. Todavia, deixamos claro que buscaremos assimilações entre os discursos dos voluntários, mas o objetivo, neste caso, é promover a categorização dos discursos.

A ideia final é reconstruirmos o argumento e, principalmente, do sentido dado àquele contexto (histórico, teórico e experimental). Trata-se de uma análise que transcende a linguística. Entendemos que esta é a análise mais adequada para a situação, uma vez que não estamos focados em realizar comparações de concepções com conceitos, muito menos avaliar a capacidade de memorização dos voluntários.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tivemos algumas dificuldades para realizar os encontros em decorrência da divergência de horários entre os participantes, mas fizemos conforme as disponibilidades apresentadas. Dessa forma, fizemos os encontros com os voluntários V_A , V_B e V_C juntos e, em outro momento, com os voluntários V_D , V_E e V_F conforme a disponibilidade de horários destes. Assim, fizemos todos os encontros em grupos com horários distintos.

4.1 Análise de dados coletados no primeiro questionário

Neste primeiro encontro, abordamos o questionário e tivemos algumas confirmações nas respostas dos voluntários. Os discursos não saíram como esperados, pois os discursos foram curtos e a maioria não promoveu uma sequência de fatos consistente, conceitos ou mesmo a analogia de experimentos condizentes com o real contexto do paradoxo de EPR. Além das questões relativas à FMC, houveram também questionamentos de cunho profissional. Vejamos então as respostas dos voluntários para cada questionamento.

4.1.1 Conhecendo os voluntários

Dos seis voluntários, apenas um deles tem segunda graduação e que está em andamento, os demais são graduados apenas em Física. Três voluntários possuem título de mestre na área de Ciências. Esses mesmos três mestres possuem menos de 2 anos de experiência em sala de aula com o ensino básico. Outros dois voluntários possuem entre 2 e 5 anos de experiência e apenas um voluntário possui mais de 5 anos de experiência no ensino básico.

Dois voluntários já lecionaram conteúdos relativos à FMC no ensino básico. No questionário, ambos relataram que abordaram apenas o efeito fotoelétrico. Entretanto, ao término do segundo encontro, um deles, V_C , afirmou que já lecionou utilizando o simulador de interferômetro de Mach-Zehnder com enfoque na dualidade onda-partícula. Os demais não abordaram a FMC no ensino básico.

Dentre os voluntários, cinco alegam que estudaram o paradoxo de EPR superficialmente na licenciatura e um alega que não estudou esse tema em sua formação docente. Do total, dois voluntários, V_C e V_F , citam que compreenderam em 70% da MQ abordada em suas licenciaturas e os demais alegaram compreensão abaixo desse valor, sendo: 60%, 30%, 20% e 0%, respostas de V_A , V_D , V_B e V_E , respectivamente. E mesmo com essas respostas, houve unanimidade ao

serem questionados se a compreensão dos conteúdos pode impactar em suas práticas docentes, todos alegam que sim.

Até aqui, vimos o resumo das respostas das seis primeiras questões. Frisamos que a ideia dessas questões era de conhece-los melhor. Portanto, veremos a seguir o que os voluntários discursaram acerca dos questionamentos voltados ao paradoxo de EPR.

4.1.2 Os discursos do primeiro encontro

Questão 7. A Física Moderna é uma área do conhecimento relativamente nova e teve seus primeiros acontecimentos no final do século XIX. Muitos dos acontecimentos ocorridos nas três primeiras décadas do século seguinte foram fundamentais para levar Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) a questionarem a descrição fornecida pela Mecânica Quântica. O questionamento feito por EPR foi impactante e permaneceu por décadas sem uma resolução cientificamente aceitável. Descreva, de forma concisa, o contexto histórico em que o questionamento foi feito.

- V_A: “Tudo o que me recordo é sobre o congresso de Solvay onde teve o encontro de vários cientistas”;
- V_B: “A discussão ocorreu em torno da dualidade onda-partícula”;
- V_C: “No século 19, foi um período de efervescência com relação da composição da luz, e vários cientistas da época deram contribuições com relação ao assunto, o destaque maior é concebido a EPR”;
- V_D: “Essa discussão ocorreu em torno do comportamento da luz no que diz respeito à dualidade onda-partícula e foi discutida durante o congresso de Solvay”;
- V_E: “Eles questionaram a Mecânica Quântica durante um encontro no congresso de Solvay, onde houve debates de vários cientistas da época sobre isso”;
- V_F: “” (*sem resposta*).

Diante das respostas apresentadas, fizemos a categorização dos discursos de cada voluntário baseando-se na Ideia Central (IC). Observamos, então, no quadro a seguir que houve uma divisão entre ideias, no qual uma parte do voluntariado citou a Conferência de Solvay como parte do contexto histórico e outra parte citou a dualidade onda-partícula. Vejamos então como ficou categorizado cada discurso:

Quadro 02 – Categorização dos discursos apresentados na questão 7 do primeiro questionário

Ideia Central (IC)	Voluntário
O congresso de Solvay	V _A , V _C e V _E
A dualidade onda-partícula	V _B , V _C e V _D

Fonte: autoria própria

Dessa forma, o DSC que melhor representa a fala desse grupo de voluntários seria, em nossa visão: *“Os debates acerca do comportamento dual da luz foram discutidos durante o congresso de Solvay, onde o destaque da discussão foi EPR que questionou a mecânica quântica”*.

Não queremos, aqui, pontuar o que está certo ou errado, mas gostaríamos de destacar alguns pontos acerca do real contexto histórico e conceitual:

- I. Houveram várias conferências de Solvay e algumas dessas, realmente, alavancaram debates sobre o comportamento dual da luz. Dentre eles, destacamos as conferências de 1927 e a de 1935.
- II. O comportamento dual da luz não é o foco de EPR, mas sim a descrição de realidade fornecida pela Mecânica Quântica. Tal descrição de realidade perpassa por aspectos filosóficos e conceituais, mas principalmente rebatendo a possibilidade de haver realidade simultânea e a interação entre duas partículas à longas distâncias. De modo que o comportamento dual da luz (geralmente estudado à luz do experimento da fenda dupla) também foi abordado por EPR, mas pontificando o colapso da função de onda (provocado pela presença de um observador).

Em seguida, veremos os discursos apresentados sobre os aspectos conceituais do paradoxo.

Questão 8. “Deus não joga dados com o Universo” e “você realmente acredita que a Lua só existe quando olhamos para ela?”, foram as citações mais marcantes de Einstein ao questionar a ‘completude’ da Mecânica Quântica. Talvez o grande receio de Einstein sempre tenha sido o fato de haver uma teoria consistente que fosse à contramão de sua teoria da relatividade. De que forma a interação a longas distâncias entre partículas poderia se contrapor à teoria da relatividade? O que leva EPR a questionar se a descrição da realidade física apresentada pela MQ está completa? (Expresse sua resposta dentro do contexto teórico/conceitual do Paradoxo de EPR)

- V_A : “Não sei”;
- V_B : “O comportamento da luz apresentado quando tem um observador, pois ela passa a se comportar como partícula e não mais como onda”;
- V_C : “Einstein teve dificuldade em aceitar essa completude da mecânica quântica, devido ao fato que a mecânica quântica estava incorporando um toque probabilístico, sendo assim, seu questionamento sobre Deus jogar dados. Para ele a natureza não era algo probabilístico e sim realístico”;
- V_D : “Einstein tinha receio quanto ao fato que nada poderia ser mais rápido que a luz e quando a probabilidade descrita na Mecânica Quântica é definida, a outra partícula também tem seu estado definido, como algo instantâneo”;
- V_E : “” (*sem resposta*);
- V_F : “Um dos princípios da Relatividade afirma que nada pode viajar a uma velocidade superior à da luz. Sendo assim, a interação instantânea entre duas partículas a longas distâncias implica que elas estariam trocando informações a uma velocidade superior à da luz”.

Aqui temos dois questionamentos cuja resposta de um leva ao contexto da outra. Todavia, nos discursos apresentados, pouco vimos a ligação entre elas. A maioria dos voluntários se limitou a responder uma ou outra. Vejamos então como ficou categorizado, no Quadro 03, cada discurso acima. Novamente, fizemos uso da IC de cada discurso para categorizá-los.

Quadro 03 – Categorização dos discursos apresentados na questão 8 do primeiro questionário

Ideia Central (IC)	Voluntário
A completude	V_B , V_C e V_D
Natureza probabilística	V_C e V_D
A velocidade da luz	V_D e V_F

Fonte: autoria própria

Dessa forma, o DSC para este questionamento seria:

“O receio de Einstein se baseia no fato que nada pode ser mais rápido que a luz, nem mesmo a interação entre partículas a longas distâncias. Einstein teve dificuldades para aceitar a completude da Mecânica Quântica uma vez que essa teoria se baseia na probabilidade e, para ele, a natureza teria aspectos realísticos”.

Aqui também precisamos fazer algumas inferências sobre o conteúdo dos discursos percorridos neste questionamento.

- I. Einstein, de fato, nunca expôs o receio quanto ao fato de haver uma teoria consistente que fosse contra à sua teoria da relatividade. Lembramos que sua teoria da relatividade, nos conduz à ideia que nada pode ser mais rápido que a luz. Dessa forma, a MQ violaria a relatividade caso estivesse ocorrendo alguma ação à distância entre partículas.
- II. O que levou EPR a questionar a descrição fornecida pela MQ foi o incômodo destes autores principalmente com a possibilidade de realidades simultâneas num mesmo sistema, o que leva à descrição probabilística. Além disso, havia incômodo com o colapso da função de onda e a possibilidade de haver interações entre partículas à longas distâncias.

A seguir, veremos os discursos apresentados quanto a solicitação da descrição de um experimento que fosse análogo ao experimento proposto por EPR.

Questão 9. Descreva, de forma objetiva, um experimento que melhor traduz o paradoxo e/ou experimento mental proposto por EPR.

- V_A: “Não sei”;
- V_B: “Imagine um feixe de luz sendo incidido sobre um equipamento com duas fendas e atrás desse equipamento tem um quadro onde é projetado o resultado da interação da luz com o equipamento”;
- V_C: “O experimento da dupla fenda”;
- V_D: “O experimento da fenda dupla”;
- V_E: “O experimento da fenda dupla?”;
- V_F: “” (*sem resposta*).

A descrição experimental fornecida por V_B refere-se ao experimento citado pelos demais voluntários, o experimento da dupla fenda. Vale ressaltar que solicitamos a descrição de um experimento e não o nome de um experimento. Dessa forma, apenas V_B interpretou adequadamente o questionamento, apesar que o experimento descrito e citado pelos demais não corresponde ao experimento mental proposto por EPR. Portanto, não faz sentido categorizarmos os discursos, pois há apenas uma categoria cuja IC está em torno do “experimento da dupla fenda”.

O experimento da dupla fenda foi realizado pela primeira vez por Thomas Young (1773-1829) e De Broglie (1924-1987) propôs a dualidade onda-partícula (Santos, 2002). EPR, na verdade, descreveu um experimento mental cujo funcionamento visa analisar o estado de cada partícula emitida por uma fonte e cujas partículas estejam separadas por uma grande distância, no qual o estado de cada uma é detectado simultaneamente.

4.2 Análise da abordagem do tema

No segundo encontro focamos nas abordagens histórica, conceitual e fenomenológica do paradoxo de EPR. Novamente tivemos de particionar os voluntários em grupos para conseguirmos conciliar com a disponibilidade de horários dos mesmos. Assim, repetimos os grupos de três voluntários formados anteriormente, V_A , V_B e V_C em um grupo e V_D , V_E e V_F em outro grupo.

Neste encontro foram abordados, além do *slide* com o conteúdo, um pequeno vídeo e o simulador interferômetro de Mach-Zehnder. Durante a apresentação do conteúdo, questionamos se os voluntários tinham alguma dúvida à respeito do que estava sendo apresentado, mas nenhuma dúvida foi levantada, apenas interferências do tipo construtiva.

Iniciamos a abordagem descrevendo um pouco sobre a vida de cada autor do paradoxo, Einstein, Podolsky e Rosen. Após, iniciamos uma introdução histórica da MQ. Frisamos que este paradoxo traz conceitos que resumem a MQ e mostramos as várias interações e divergência de pensamentos entre alguns personagens que, de certo modo, influenciaram EPR.

Iniciamos o contexto teórico com as hipóteses dadas por EPR e mostramos o motivo pelo qual eles questionaram a descrição da realidade física fornecida pela MQ. Assim, mostramos que a conclusão de EPR baseia-se na não-comutatividade dos operadores que descrevem os sistemas e na sobreposição de estados (realidades simultâneas) em um mesmo sistema.

Durante a apresentação dos *slides*, constante no Apêndice C, não tivemos dúvidas acerca do conteúdo para inferir sobre elas, apenas confirmações de informações, tais como quando citamos sobre a badalada imagem de Einstein e vários cientistas da época “na conferência de Solvay de 1927” conforme o V_F citou.

Encaminhamos o vídeo para os voluntários assistirem e abordamos o interferômetro de Mach-Zehnder. O vídeo explora mais a fundo o emaranhamento quântico, a “ação à distância”, sendo complementar ao que foi visto na apresentação. Enquanto que a abordagem do simulador interferômetro de Mach-Zehnder não houve interações, reconhecemos que nossa abordagem

foi restrita às interações em decorrência do tempo fornecido pelo *Google Meet* para transmissões gratuitas, bem como estávamos limitados à disponibilidade de horários dos voluntários. Assim, focamos em descrever o que estava ocorrendo conforme a aplicação de um observador e dos filtros polaroides.

Após a apresentação com os filtros polaroides, deixamos em aberto o questionamento: “através deste, conseguimos saber por onde os fótons estão passando? Como podemos saber a trajetória dos fótons sem que o padrão seja destruído?” para que os voluntários pudessem pensar à respeito. A seguir, veremos o que os voluntários discursaram no segundo questionário.

4.3 Análise de dados coletados no segundo questionário

Utilizamos outro questionário aberto e desta vez não abordamos questões pertinentes à formação dos voluntários, mas questionamos sobre a opinião deles acerca da importância do tema e sua possível abordagem. Vejamos, então, o que os voluntários disseram.

Questão 1. A Física Moderna é uma área do conhecimento relativamente nova e teve seus primeiros acontecimentos no final do século XIX. Muitos dos acontecimentos ocorridos nas três primeiras décadas do século seguinte foram fundamentais para levar Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) a questionarem a descrição fornecida pela Mecânica Quântica. O questionamento feito por EPR foi impactante e permaneceu por décadas sem uma resolução cientificamente aceitável. Descreva, de forma concisa, o contexto histórico em que o questionamento foi feito:

- V_A: “O contexto em que EPR questionou a descrição formal da Quântica, foi uma época de bastante euforia e discussões sobre diversos temas da física moderna. Muitos dos debates ocorreram nas conferências de Solvay, mas deixaram muitas dúvidas e houve muita divergência de pensamentos”;
- V_B: “EPR questionou a Mecânica Quântica num momento de muitas discussões sobre a dualidade onda-partícula e as interpretações sobre as descrições que a Mecânica Quântica fornecia”;
- V_C: “O século 19 foi um século em que muitas mentes estavam trabalhando para solucionar problemas relacionados a nova Física que estava surgindo (a MQ), no entanto para poder avançar era necessário resolver um problema relacionado a natureza da luz. O problema consistia em elaborar uma definição concisa sobre a composição da luz”;
- V_D: “O questionamento foi feito durante o congresso de Solvay, num período de debates sobre a natureza dual da luz e interpretações sobre o formalismo quântico no qual predominava o pensamento ortodoxo pregado por Bohr”;

- V_E : “Eles questionaram a Mecânica Quântica quando viram que essa área de conhecimento não estava respondendo a todos os questionamentos. Isso aconteceu em meio a muitas discussões sobre a dualidade onda-partícula e sobre o emaranhamento quântico”;
- V_F : “O questionamento feito por EPR, chamado de paradoxo de EPR baseia-se em um experimento mental sobre a natureza da previsão de um sistema quântico: o resultado de uma medição realizada em uma parte do sistema quântico pode ter um efeito instantâneo no resultado de uma medição realizada em outra parte, independentemente da distância que separa as duas partes”.

Ao obter esses discursos, podemos ver o quanto mudaram após a apresentação do tema. Frisamos que solicitamos, nesta questão, uma descrição do contexto histórico e chegamos a obter respostas dispersas ao contexto solicitado. Ainda assim, fizemos a categorização desses novos discursos de cada voluntário baseando-se na Ideia Central (IC). Vejamos então como ficou categorizado cada discurso conforme o quadro abaixo:

Quadro 04 – Categorização dos discursos apresentados na questão 1 do segundo questionário

Ideia Central (IC)	Voluntário
A euforia de discussões	V_A, V_B e V_C
A conferência de Solvay	V_A e V_D
O colapso da função de onda	V_F
Dualidade onda-partícula	V_B, V_C, V_D e V_E

Fonte: autoria própria

Para elaborar o DSC desta vez, focamos nas partes dos discursos voltadas ao contexto histórico. Assim, observamos que o discurso de V_F descreve a natureza experimental proposta por EPR, o que seria uma resposta plausível para o terceiro questionamento. Dessa forma, o discurso do sujeito coletivo que melhor representa a fala desse grupo de voluntários seria, em nossa visão:

“EPR questionou a Mecânica Quântica quando observaram que esta não estava respondendo a todos os questionamentos. Assim, EPR apresenta, na conferência de Solvay, um trabalho que baseia-se no efeito instantâneo entre sistemas. Esse questionamento foi feito em um momento de grande euforia e debates acerca de alguns conceitos e interpretações dadas à Mecânica Quântica, dentre eles a natureza dual da luz. Na época, predominava o pensamento ortodoxo defendido por Bohr. Dessa forma, denotando a grande divergências de pensamentos entre as mentes da época, principalmente em relação a uma definição concisa sobre a composição da luz”.

Mediante a este novo discurso, podemos observar um contraste em relação ao discurso dado no primeiro encontro para este mesmo questionamento. Num primeiro momento, os voluntários deram enfoque à natureza dual da luz. Apesar de ter ocorrido debates acerca desse tema nas conferências de Solvay, não foi esse o foco de EPR. Enquanto que neste último momento, os voluntários demonstraram maior domínio do contexto histórico, conforme solicitado, mesmo voltando a citar a dualidade onda-partícula. A seguir, veremos os discursos acerca do aspecto conceitual do paradoxo.

Questão 2. “Deus não joga dados com o Universo” e “você realmente acredita que a Lua só existe quando olhamos para ela?”, foram as citações mais marcantes de Einstein ao questionar a ‘completude’ da Mecânica Quântica. Talvez o grande receio de Einstein sempre tenha sido o fato de haver uma teoria consistente que fosse à contramão de sua teoria da relatividade. De que forma a interação a longas distâncias entre partículas poderia se contrapor à teoria da relatividade? O que leva EPR a questionar se a descrição da realidade física apresentada pela MQ está completa? (Expresse sua resposta dentro do contexto teórico/conceitual do Paradoxo de EPR);

- V_A: “A velocidade com que há uma comunicação entre as duas partículas seria maior que a velocidade da luz. Todavia, a Quântica cita que, na verdade, temos uma sobreposição de realidades, como Bohr chegou a afirmar, ‘as informações coexistem, mas são mutuamente excludentes’”;
- V_B: “Nada pode ser mais rápido que a luz. Isso também contribuiu para EPR questionar a Mecânica Quântica. O que levou EPR a questionar a MQ foi justamente a explicação probabilística fornecida, pois esta não explica o fato de uma partícula B ter seu estado definido em função da medição na partícula A”;
- V_C: “O que Einstein não aceitava era que sua teoria não poderia ter um caráter probabilístico, para ele a natureza era como era e não obra do acaso, levado e regido pela probabilidade”;
- V_D: “A interação a longas distâncias era contra o princípio de que nada pode ser mais rápido que a luz. Com isso, EPR questiona tanto essa interação a longa distância como o fato que o mesmo sistema pode ser descrito por duas funções”;
- V_E: “EPR não estavam satisfeitos com o fato que a mesma realidade deveria ser vista por dois ângulos, como se tivessem dois estados sobrepostos. Além disso, eles contestaram a ação a distância entre dois sistemas”;
- V_F: “No contexto do paradoxo de EPR, deveria haver algum mecanismo ainda desconhecido atuando no sistema, de modo a ocasionar os efeitos observados de ‘não-comutação dos observáveis quânticos’”.

Novamente tivemos uma mudança nos discursos expostos pelos voluntários. Vejamos, então, a categorização desses novos discursos no Quadro 05 no qual nos baseamos nas ICs para categorizá-los:

Quadro 05 – Categorização dos discursos apresentados na questão 2 do segundo questionário

Ideia Central (IC)	Voluntário
A completude	V_A, V_B, V_D, V_E e V_F
Natureza probabilística	V_A, V_B, V_C e V_E
A velocidade da luz	V_A, V_B

Fonte: autoria própria

Neste momento, gostaríamos de fazer algumas inferências acerca da categorização dos discursos, são elas:

- I. Quando tratamos de “informações coexistentes e mutuamente excludentes”, estamos nos referindo à um sistema que possui informações simultâneas e que, estas, podem ser definidas (uma ou outra). Dessa forma, estamos falando de probabilidade, pois existe uma probabilidade da informação ser definida em um estado ou outro, justificando a categorização do discurso do voluntário A também com IC de natureza probabilística.
- II. O fato dos operadores de sistemas diferentes não comutarem implica, necessariamente, em resultados complementares para os sistemas. Este fato justifica a classificação do discurso de V_F com IC voltada para a completude.

Desta vez, o DSC se demonstra mais objetivo e alinhado aos reais aspectos do paradoxo de EPR. Assim, obtemos o seguinte DSC:

“A velocidade de interação entre as partículas, pois nada pode ser mais rápido que a luz. Todavia, o que levou EPR a questionar a MQ foi a sobreposição de realidades, o que nos leva a uma descrição probabilística da realidade. Para eles, a natureza não se trata de algo do acaso e nem regida pela probabilidade”.

Verificamos que a ideia do discurso voltado para a primeira parte (referente à teoria da relatividade e o possível receio de Einstein) não modificou. Enquanto o novo DSC apresentado para a segunda parte (voltada aos motivos que levou EPR a questionar a MQ), retrata maior detalhamento no pensamento dos voluntários. Se antes eles citaram a completude, dessa vez

trouxeram a “sobreposição de realidades” como ideia análoga. Vejamos, então, o que eles discursaram acerca da descrição do experimento mental.

Questão 3. Descreva, de forma objetiva, um experimento que melhor traduz o paradoxo e/ou experimento mental proposto por EPR.

- V_A : “O experimento proposto por Bohm, seriam duas partículas que partiram da mesma origem e se direcionam para sentidos opostos. De modo que cada uma passa por um detector e, ao medir o estado de ambas simultaneamente, elas sempre tem resultados complementares. Se uma é positiva, por exemplo, a outra é negativa”;
- V_B : “Sejam dois sistemas compostos pelas partículas A e B, partindo da mesma origem, se dirigindo a sentidos opostos, em uma longa distância. Ao medir o estado da partícula A, o estado da partícula B será medido instantaneamente e estará no estado oposto. O resultado será sempre complementar”;
- V_C : “O experimento da dupla fenda, sendo que neste experimento é possível identificar os padrões que os elétrons formam, e isso ajuda a compreender como funciona este processo onda-partícula”;
- V_D : “Não sei”;
- V_E : “O experimento de Bohm de duas partículas se distanciando”;
- V_F : “” (*sem resposta*).

Observamos que V_F deixou a resposta em branco para esse questionamento, mas o mesmo trouxe aspectos do experimento mental de EPR no primeiro questionamento. Assim, resgatamos sua resposta e a levamos em consideração neste questionamento.

- V_F : “O questionamento feito por EPR, chamado de paradoxo de EPR baseia-se em um experimento mental sobre a natureza da previsão de um sistema quântico: o resultado de uma medição realizada em uma parte do sistema quântico pode ter um efeito instantâneo no resultado de uma medição realizada em outra parte, independentemente da distância que separa as duas partes”.

Outro voluntário que não expressou uma descrição foi V_D . Neste caso, não tomaremos seu discurso em consideração para elaboração do DSC. Quanto aos demais discursos, observamos que no primeiro questionário os discursos convergiram para o experimento da dupla fenda de Thomas Young, enquanto que, desta vez, tivemos um resultado diferente, pois conforme o Quadro 06 a maioria optou discursar sobre a interpretação experimental de David Bohm. Vejamos a categorização dos discursos com propostas experimentais:

Quadro 06 – Categorização dos discursos apresentados na questão 3 do segundo questionário

Ideia Central (IC)	Voluntário
A interpretação de David Bohm	V _A , V _B , V _E e V _F
O experimento da fenda dupla	V _C

Fonte: autoria própria

O interessante nesse questionamento é que, além da mudança de discurso da maioria dos voluntários, observamos que um dos voluntários voltou a citar o experimento da dupla fenda. Observamos esse fato no discurso apresentado pelo voluntário V_C. Neste caso, não levaremos em consideração esse trecho, pois, em nossa visão, não representa o pensamento coletivo. Feito essa observação, vejamos então o DSC que melhor representa os discursos dados:

“Sejam dois sistemas compostos pelas partículas A e B, partindo da mesma origem, em sentidos opostos e separados por uma longa distância. Será feita uma medição simultânea em ambas e o resultado da medição dos estados das partículas A e B se mostram complementares, independente da distância que as separam. Assim, as medidas são opostas”.

Observamos uma clara mudança de pensamento dos voluntários que, antes, não conseguiram expor/descrever um experimento mental compatível com aquele proposto por EPR. Neste momento, parte dos voluntários descreveram, com objetividade, um experimento que converge com a interpretação proposta por David Bohm. A seguir, veremos o que pensam os voluntários acerca da relevância e abordagem do tema.

4.3.1 O que dizem os voluntários sobre o tema?

Os discursos apresentados nos questionamentos a seguir não serão categorizados e não contém uma DSC, pois nossa intenção com os questionamentos a seguir é conhecer o que os voluntários pensam acerca do tema e analisá-las com as lentes pedagógicas. Assim, vimos que não há unanimidade entre os voluntários quanto à importância do tema, mas há comentários dos quais podemos destacar alguns pontos.

Questão 4. Em sua opinião, esse tema é relevante para a formação crítica do cidadão?

- V_A: “Pouco relevante, pois não tem aplicações no dia-a-dia”;
- V_B: “Sim, pois diariamente temos notícias sobre a Física Moderna e descobertas da astronomia que dependem diretamente de conceitos ligados à esse tema”;
- V_C: “Bastante relevante, tendo em vista que abre possibilidades pedagógicas para serem trabalhados vários temas, dentre um deles a argumentação em sala de aula e isso contribui significativamente para a formação do cidadão”;
- V_D: “Sim. Seria um equívoco afirmar que não, pois se trata de Física Moderna. Não devemos apenas abordar a Física Clássica em sala de aula e o paradoxo de EPR resume bem muitos dos conteúdos da Física Moderna”;
- V_E: “Sim, pois promove o conhecimento sobre a construção da nova ciência”;
- V_F: “Não”.

Em suma, observamos no comentário de V_A que um tema relevante para a formação crítica seria um conteúdo utilizável no dia-a-dia do cidadão. Por outro lado, V_B destaca as descobertas da astronomia e se refere aos informes noticiários. O voluntário V_C explicita que o tema, além de relevante, possibilita possibilidades pedagógicas e destaca a argumentação como contribuição para formação crítica do cidadão. V_D destaca que o tema faz parte da ciência moderna e que não devemos nos deter a abordar apenas a Física Clássica em sala de aula. Enquanto que V_E cita o conhecimento acerca da nova ciência, V_F entende o tema como irrelevante e não trouxe argumentos à respeito.

Acerca da relevância do tema, frisamos que este (o paradoxo de EPR) envolve vários conceitos da FMC e que categorizar o tema como irrelevante compromete a relevância dos conceitos intrínsecos neste tema. Dessa forma, acreditamos que o tema seja relevante e nos permite explorar a capacidade de argumentação, bem como mostrar que a ciência que temos hoje não se resume à Física Clássica. Vejamos, então, o que foi dito acerca do tema ser abordado nas próximas práticas docentes dos voluntários.

Questão 5. Nas suas próximas práticas docente, você pretende abordar os conteúdos da FMC com seus alunos?

- V_A: Com certeza. Esse paradoxo pode ser mostrado como um resumo de muito conteúdo da Física Moderna. Essa poderia ser uma forma a ser adotada em sala de aula, porém trabalhado com mais tempo. Por exemplo, numa aula abordar a história, na outra levar o simulador e levantar questionamentos, seria uma ótima maneira também de se trabalhar. Assim, pretendo encaixar esse conteúdo também nos meus planos de aula”.

- V_B: “Futuramente sim. No momento não, pois trabalhando em escola particular e dependendo de uma estrutura curricular preparada com foco no ENEM (Exame Nacional do Ensino Médio) não há essa possibilidade, mas estarei abordando o tema quando houver a possibilidade”.
- V_C: “Sim, pois vejo neste tema uma potencialidade pedagógica”.
- V_D: “Sim, pois é um tema interessante e que precisa ser mais explorado no ensino básico. Vou procurar abordar com meus alunos como forma de teste pra mim mesmo, pois pouco ensinei sobre a física moderna nas minhas aulas”
- V_E: “Talvez. Se tiver oportunidade, sim”.
- V_F: “Sim, considerando os fatores que possibilitem esta abordagem”.

Mesmo com as condições impostas e havendo um voluntário afirmando que o tema é irrelevante, houve unanimidade e todos citaram que pretendem abordar os conteúdos da FMC com seus próximos alunos. Entretanto, há alguns fatores preocupantes nas respostas de alguns voluntários, tais como o que foi expresso por V_B, ao citar que a estrutura curricular da escola em que trabalha é voltada ao ENEM. De modo que a MQ é raramente, ou nunca, abordada nesse exame, isso também se reflete nas salas de aula, onde os alunos são preparados para resolvê-lo. V_F citou “fatores que possibilitem esta abordagem”, mas não citou quais fatores seriam estes. Todavia, entendemos que os fatores citados por V_F, seja o conjunto de barreiras que esteja se formando e impedindo a exploração da MQ no ensino básico, dentre eles, os livros didáticos, a estrutura curricular das escolas, os planos de ensino e de aulas e, principalmente, a formação docente.

CONCLUSÃO

O ensino da FMC no ensino básico é pouco abordado e quando se faz presente é de forma branda, não explora os temas mais atuais da MQ e as discussões que podem aguçar a criticidade dos alunos. Vimos que uma das principais causas a este fenômeno é a formação dos professores e isto não é novidade, mas esta pesquisa, que possui caráter exploratório, nos traz evidências ainda maiores dessa deficiência, uma vez que houve mudança nos discursos apresentados e cujos contextos apresentados nos discursos pré-teste não condiziam, integralmente, à realidade.

Com objetivo de analisar as concepções de alguns professores de Física acerca do paradoxo de EPR, foi feito um estudo que nos levou à uma metodologia e elaboração de materiais que foram abordados junto aos voluntários. Os questionários abertos foram a principal fonte de coleta de dados e nos mostrou aquilo que já desconfiávamos que ocorreria, houve mudança na ideia dos discursos apresentados em resposta às perguntas do questionário.

No primeiro momento, os discursos estavam dispersos e, a maioria, sem nexo quanto aos contextos histórico, conceitual e fenomenológico do tema. Todavia, no segundo questionário, obtivemos discursos que mostraram maior domínio e concisão quanto aos contextos. Esse fato nos leva a crer que haviam falhas conceituais na estrutura e domínio do conteúdo e que tais falhas foram trabalhadas para nos fornecer discursos mais concisos. Ainda cabe observar que, mesmo após a abordagem do conteúdo no segundo encontro, houveram partes nos discursos que não condizem com a realidade, ainda assim foram bem mais concisos.

Aqui queremos destacar dois pontos do primeiro questionário. Primeiro o fato que os voluntários atribuíram um nível de compreensão acerca da MQ e que esses níveis atribuídos foram, na maioria dos casos, insatisfatórios. Segundo que, apesar dos níveis insatisfatórios de compreensão, houve unanimidade ao serem questionados se a compreensão dos conteúdos pode impactar em suas práticas docentes, todos alegaram que sim. Temos, portanto, uma admissão ao fato que há deficiência na formação docente e que os impactos são repassados ao ensino básico.

Outro aspecto importante é que um voluntário não reconheceu a relevância do tema para a formação crítica do cidadão. Todavia, conforme vimos, o tema perpassa por toda a história da MQ e abrange vários conceitos. Assim sendo, o tema torna-se relevante para a ciência e para o mundo moderno. Compreendê-lo é uma questão que transcende qualquer aplicação no dia-a-dia, é uma questão de sobrevivência para a MQ, para a ciência moderna.

Não podemos ser concordantes e concernentes ao fato que possa haver um professor que deseje abordar um conteúdo e não tenha domínio sobre ele. Nesse sentido, pensemos na seguinte analogia do requisito domínio de conhecimento:

A prática de velejar coloca a necessidade de saberes fundantes como o do domínio do barco, das partes que o compõem e da função de cada uma delas, como o conhecimento dos ventos, de sua força, de sua direção, os ventos e as velas, a posição das velas, o papel do motor e da combinação entre motor e velas. Na prática de velejar se confirmam, se modificam ou se ampliam esses saberes (FREIRE, 2002, p. 11).

Assim como velejar exige domínios conceituais do instrumento utilizado para a prática esportiva, lecionar requer domínio do conhecimento a que se sujeita lecionar. O professor não pode se sujeitar a limitar o conteúdo a ponto de prejudicar a evolução e criticidade dos alunos. É necessário que essa seleção de conteúdos seja feita de forma reflexiva e abrangja não só a MC, mas também a FMC, incluindo a MQ. Relembramos que essa seleção de conteúdo é alvo de críticas de BRASIL (2002).

Por fim, destacamos o fato observado que estes conhecimentos estão ‘vivos’ nas mentes dos professores, mas em desordem. Todavia, o conhecimento em desordem não serve para ser lecionado. Portanto, a conclusão que chegamos é que há falhas no domínio do tema por parte dos professores de Física e que estas falhas conceituais podem ser facilmente corrigidas com dedicação e pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANGOTTI, J. A. P. Conceitos Unificadores e Ensino de Física. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 15, n. 1-4, 1993.

ASTOLFI, J. P. El aprendizaje de conceptos científicos: aspectos epistemológicos, cognitivos y lingüísticos. In: **Enseñanza de las ciencias**. Valencia. v. 6, n. 2, 1988, p. 147-155.

BRASIL. Ministério da educação. **Base Nacional Comum Curricular: educação é a base**. Brasília: MEC, 2020.

_____. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica. Guia de livros didáticos: **PNLD 2015**: física: ensino médio - Brasília, 2014.

_____. Ministério da educação, Secretaria da Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais: ensino médio**. Parte III - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/SEMTEC, 1999.

_____. Ministério da educação, Secretaria da Educação Média e Tecnológica. **PCN+ ensino médio: Orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais**. Ciência da Natureza, Matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.

BAKHTIN, Mikhail. **Questões de literatura e estética: a teoria do romance**. São Paulo: Unesp, 1998. Disponível em: <http://www.oziris.pro.br/enviados/201342124251.pdf>. Acesso em: 12 de out. 2020.

BELL J. S. On the Einstein-Poldolsky-Rosen paradox. In: **Physics**. v.1, 1964, p.195-200.

BOHM, D. J. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables II. In: **Physical Review**. v. 85, n. 2, 1952. p. 180-193.

BOHR. N. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete? In: **Physical Review**, v. 48, 1935. p. 696-702.

BROWN, H. R. O debate Einstein-Bohr sobre a Mecânica Quântica. Universidade Estadual de Campinas. In: **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**. n. 2, 1981. p. 51-89.

CHEVALLARD, Y. **La transposición didáctica del saber sabio al saber enseñado**. Tradução de Claudia Gilman. Aique, Buenos Aires, 1991.

CHIARELLI, R. A. **Física moderna e contemporânea no ensino médio: é possível abordar conceitos de mecânica quântica?** (Dissertação). Porto Alegre, 2006.

EINSTEIN, A. Carta para Max Born, 27 jan. 1920. In: **The Born-Einstein Letters: the correspondence between Max & Hedwig Born and Albert Einstein 1916-1955**. (tradução de Irene Born). Glasgow: Macmillan, 1971. p. 240.

EINSTEIN, A.; PODOLKSY, B.; ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complet? In: **Physical Review**. v. 47, 1935, p. 777- 780.

FARACO, Carlos Alberto. **Linguagem e diálogo: as ideias linguísticas do círculo de Bakhtin**. São Paulo: Parábola, p. 169. 2009.

FIORENTINI, D.; LORENZATO, S. **Investigação em Educação Matemática: percursos teóricos e metodológicos**. 2 ed. Campinas, SP: Autores Associados, 2007.

FREIRE, Paulo Reglus Neves. **Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa**. 25ª ed. São Paulo: Paz e Terra, 2002. Disponível em: <http://www2.uesb.br/pedh/wp-content/uploads/2014/02/Pedagogia-da-Autonomia.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2022.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOODWIN, P. G.; JOHNSON-LAIRD, P. N. Conceptual illusions. In: **Cognition**, 2010. p. 253-265.

GODOY, A. S. Pesquisas qualitativas: tipos fundamentais. In: **Revista de Administração de Empresas**. v. 35, 3. ed. Mai/Jun. São Paulo, 1995. p. 20-29

GODOY, Walquiria. **Explorações filosóficas da não-localidade em Física Quântica: desdobramentos do argumento de EPR**. (dissertação de mestrado). São Paulo, 2018.

HASS, A. General Theory of Spectra. In: **Atomic Theory: an elementary exposition**. Tradução de T. Verschoyle (2020). Londres e Tonbridge: De Gruyter, abr. de 1927. p. 197-203.

JOHNSON-LAIRD. P. N. Mental models and cognitive change. In: **Journal of Cognitive Psychology**. Princeton, Princeton University. v. 25, n. 2, 2013. p. 131-138.

JOHNSON-LAIRD, P. N.; GIBBS, G.; MOWBRAY, J. de. Meaning, amount of processing and memory for words. In: **Memory & Cognition**. v. 6, 1978. p. 372-375.

KHEMLANI, S.; JOHNSON-LAIRD, P. N. Cognitive changes from explanations. In: **Journal of Cognitive Psychology**. v. 25, n. 2, 2013. p. 139-146.

KUBO, O. M.; BOTOMÉ, S. P. Ensino-aprendizagem: uma interação entre dois processos comportamentais. In: **Interação em psicologia**. v. 5. 2001. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/psicologia/article/view/3321/2665>. Acesso em: 18 set. 2020.

LEFEVRE, Fernando; LEFEVRE, Ana Maria Cavalcanti. **Depoimentos e discursos: uma proposta de análise em pesquisa social**. Brasília: Liber Livro, série pesquisa, v. 12, 2005.

_____. **O discurso do sujeito coletivo: um novo enfoque em pesquisa qualitativa**. 2. ed. Caxias do Sul, RS: Educs, 2005.

LUDOVICO, F. M. et al. Covid-19: desafios dos docentes na linha de frente da educação. In: **Interfaces Científicas**. Aracajú, v. 10, n. 1, 2020. p. 58-74.

MARQUES, T. C. F. et al. Ensino de física moderna e contemporânea na última década: revisão sistemática de literatura. In: **Scientia Plena**. v. 15, n. 7, 2019.

MATTHEWS, M. R. **History, Philosophy and Science Teaching: New Perspectives**. Springer. Science & Education. 1995.

_____. **History, Philosophy and Science Teaching: The Present Rapprochement**. Science & Education, v. 1, 1992. p. 11-47.

MOREIRA, M. A. **Uma análise crítica do ensino de Física**. Estud. av, v. 32, n. 94, 2018. p. 73-80. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142018000300073. Acesso em: 17 maio 2019.

NÉBIAS, Cleide. Formação dos conceitos científicos e práticas pedagógicas. In: **Interface-Comunicação, Saúde, Educação**, v. 3, n. 4, 1999. p. 133-140.

OLIVEIRA, Maria, Marly de. **Sequência didática interativa no processo de formação de professores**. Petrópolis: Vozes, 2013.

PESSOA JR, Osvaldo. Introdução histórica à teoria quântica, aos seus problemas de fundamento e às suas interpretações. In: **Caderno de Física da UEFS**. v. 04, 2006. p. 89-114.

PIETROCOLA, M. **Inovação curricular e gerenciamento de riscos didático-pedagógicos: o ensino de conteúdos da Física Moderna e Contemporânea na escola média**. São Paulo: USP, 2010.

RICHARDSON, Roberto Jarry. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2015.

SANTOS, C. A. dos. **Experimento da dupla fenda de Young**. 2002. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/historia/young.html>. Acesso em: 07 de abr de 2022.

SIQUEIRA, M. R. da P. **Professores de física em contexto de inovação curricular: saberes docentes e superação de obstáculos didáticos no ensino de física moderna e contemporânea**. (Tese de doutorado). São Paulo: 2012.

SOARES, J. M. **Análise da história do efeito fotoelétrico em livros didáticos de Física para graduação**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, p. 87. 2016.

SOLVAY, Institut International de Physique. Discussion Générale des Idées Nouvelles Émises. In: **Électrons et Photons - Rapports et Discussions de Cinquième Conseil de Physique**. Paris. Gauthier-Villars, p. 262. 1928.

_____. Discussion Générale des Idées Nouvelles Émises. In: **Électrons et Photons - Rapports et Discussions de Cinquième Conseil de Physique**. Paris. Gauthier-Villars, 1928. p. 262. Tradução de Pessoa Jr., O. (org.), Fundamentos da Física 2 – Simpósio David Bohm, São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2001, p. 139-172.

STUDART, Nelson. A invenção do conceito de quantum de energia segundo Planck. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4. São Carlos, 2000. p. 523-535.

TENFEN, D. N.; TENFEN W. O modelo atômico de Bohr e suas limitações na interpretação do espectro do átomo de hélio. In: **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. 34(1) ed. 2017. p. 217-235.

YIN, Robert K. **Estudo de caso, planejamento e métodos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

APÊNDICE A – PRIMEIRO QUESTIONÁRIO

Universidade Estadual da Paraíba
CCT – Centro de Ciência e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática
Nome do voluntário:

QUESTIONÁRIO DE PESQUISA

1) Além da licenciatura em Física, você possui mais alguma graduação (concluída ou em andamento)? Se sim, qual a área de formação?

R:

2) Você possui algum curso de pós-graduação (concluído ou em andamento)? Se sim, qual a área de formação?

R:

3) Por estimativa, qual o seu tempo de experiência como professor no ensino básico?

R:

4) Você já lecionou conteúdos pertencentes à Física Moderna e Contemporânea no ensino básico? Se sim, qual(is)? E quais as principais dificuldades encontradas? Se não, por qual(is) motivo(s)?

R:

5) Você estudou sobre o paradoxo de EPR em sua licenciatura?

R:

6) Numa escala de 0 a 10, o quão você conseguiu compreender a disciplina de Mecânica Quântica em sua licenciatura? Você acredita que sua compreensão sobre o assunto possa influenciar na sua prática docente acerca do conteúdo?

R:

7) A Física Moderna é uma área do conhecimento relativamente nova e teve seus primeiros acontecimentos no final do século XIX. Muitos dos acontecimentos ocorridos nas três primeiras

décadas do século seguinte foram fundamentais para levar Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) a questionarem a descrição fornecida pela Mecânica Quântica. O questionamento feito por EPR foi impactante e permaneceu por décadas sem uma resolução cientificamente aceitável. Descreva, de forma concisa, o contexto histórico em que o questionamento foi feito;

R:

8) “Deus não joga dados com o Universo” e “você realmente acredita que a Lua só existe quando olhamos para ela?”, foram as citações mais marcantes de Einstein ao questionar a ‘completude’ da Mecânica Quântica. Talvez o grande receio de Einstein sempre tenha sido o fato de haver uma teoria consistente que fosse à contramão de sua teoria da relatividade. De que forma a interação a longas distâncias entre partículas poderia se contrapor à teoria da relatividade? O que leva EPR a questionar se a descrição da realidade física apresentada pela MQ está completa? (Expresse sua resposta dentro do contexto teórico/conceitual do Paradoxo de EPR);

R:

9) Descreva, de forma objetiva, um experimento que melhor traduz o paradoxo e/ou experimento mental proposto por EPR.

R:

APÊNDICE B – SEGUNDO QUESTIONÁRIO

Universidade Estadual da Paraíba
CCT – Centro de Ciência e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática
Nome do voluntário:

QUESTIONÁRIO DE PESQUISA

1) A Física Moderna é uma área do conhecimento relativamente nova e teve seus primeiros acontecimentos no final do século XIX. Muitos dos acontecimentos ocorridos nas três primeiras décadas do século seguinte foram fundamentais para levar Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) a questionarem a descrição fornecida pela Mecânica Quântica. O questionamento feito por EPR foi impactante e permaneceu por décadas sem uma resolução cientificamente aceitável. Descreva, de forma concisa, o contexto histórico em que o questionamento foi feito:

R:

2) “Deus não joga dados com o Universo” e “você realmente acredita que a Lua só existe quando olhamos para ela?”, foram as citações mais marcantes de Einstein ao questionar a ‘completude’ da Mecânica Quântica. Talvez o grande receio de Einstein sempre tenha sido o fato de haver uma teoria consistente que fosse à contramão de sua teoria da relatividade. De que forma a interação a longas distâncias entre partículas poderia se contrapor à teoria da relatividade? O que leva EPR a questionar se a descrição da realidade física apresentada pela MQ está completa? (Expresse sua resposta dentro do contexto teórico/conceitual do Paradoxo de EPR);

R:

3) Descreva, de forma objetiva, um experimento que melhor traduz o paradoxo e/ou experimento mental proposto por EPR.

R:

4) Em sua opinião, esse tema é relevante para a formação crítica do cidadão?

R:

5) Nas suas próximas praticas docente, você pretende abordar os conteúdos da FMC com seus alunos?

R:

APÊNDICE C – APRESENTAÇÃO (SLIDES)

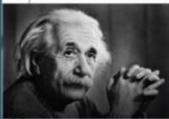
UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

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

O PARADOXO DE EPR

Por: Msn. Claudson Eduardo A. B. Barros
Orientador: Marcos A. Barros.

Quem são os personagens desse paradoxo?



Fonte: fisicaestudopratico.com.br

- ▶ Albert Einstein (1879-1955)
- ▶ Físico, alemão, conclui a graduação em 1900 na mesma instituição onde foi professor, a Escola Politécnica de Zurique;
- ▶ Casou-se em 1903 com Mileva Maric
- ▶ “O ano miraculoso”, 1905: Teoria explicativa para o efeito fotoelétrico; O movimento browniano; A relatividade especial; A equivalência entre massa e energia.
- ▶ 1909: Professor na Universidade de Zurique;
- ▶ 1910: Professor na Universidade de Praga;
- ▶ 1912: Lecionou na Escola Politécnica Federal da Suíça;

Quem são os personagens desse paradoxo?



Fonte: fisicaestudopratico.com.br

- ▶ 1913: Professor da Universidade de Berlim, diretor do Instituto Kaiser Wilhelm de Física e membro da Academia de Ciências da Rússia;
- ▶ 1921: Laureado com prêmio Nobel pelo seu trabalho de efeito fotoelétrico e teoria quântica;
- ▶ 1932: Se muda para a Califórnia;
- ▶ 1933: Ingressou no Instituto de Estudos Avançados de Princeton;
- ▶ 1935: O “boom” para a Física Quântica: O paradoxo de EPR;
- ▶ 1940: Ganhou cidadania norte-americana;
- ▶ 1945: Encerrou sua carreira.

Quem são os personagens desse paradoxo?



Fonte: <https://antimoon.world/>

- Boris Yakovlevich Podolsky (1896-1966)
- Físico, russo, imigrou para o EUA em 1911;
- 1928: PhD no Instituto de Tecnologia da Califórnia;
- 1930-1933: Morou na URSS;
 - diretor de física teórica no Instituto Físico-Técnico Ucrainiano;
- 1933: Retorna ao EUA;
- 1934: Institute for Advanced Study (IAS), Princeton;
- 1935: O "boom" para a Física Quântica: O paradoxo de EPR;
- 1940: Professor de Física-Matemática na Universidade de Cincinnati;
- 1961-1966: Professor na Universidade de Xavier;

Quem são os personagens desse paradoxo?



Fonte: physicstoday.scitation.org

- Nathan Rosen (1909-1995);
- Norte-americano;
- 1929: Bacharel em engenharia eletroquímica;
- 1932: Doutor em Física;
 - Produziu o primeiro cálculo de MQ confiável da estrutura da molécula de hidrogênio;
- 1935: O "boom" para a Física Quântica: O paradoxo de EPR;
- 1935: Einstein-Rosen Bridge (buraco da minhoca);

Quem são os personagens desse paradoxo?



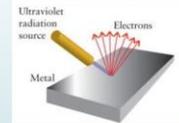
Fonte: physicstoday.scitation.org

- 1936-1938: Professor na Universidade Estadual de Kiev;
- 1937: Einstein-Rosen: On gravitational waves;
- 1961: Fundador da Academia Nacional de Ciências e Ciências Humanas de Israel;
- 1969: Ajudou a fundar a escola de engenharia na Universidade Ben Gurion de Negev;
- Depois de passagens pelo MIT, Black Mountain College na Carolina do Norte e na Universidade da Carolina do Norte, Rosen aceitou uma cátedra de física no Instituto de Tecnologia de Israel em Haifa, onde fundou o Instituto de Física Teórica de Technion;
- 1979: Aposentou-se como professor emérito em Física.

Introdução histórica – Da MQ a EPR

- Dirac (ensaios com tubos de raios catódicos):
 - Lenard: observou o efeito fotoelétrico

Imagem 1 – Efeito fotoelétrico



Fonte: Atkins Chemical Principles, figura 5e

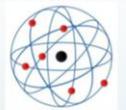
Introdução histórica – Da MQ a EPR

- 1905: Einstein e o quanta de luz.

Em resposta tanto aos trabalhos teóricos de Max Planck e aos trabalhos experimentais de Lenard, Einstein sugere que a radiação existiria em forma de pacotes espacialmente localizados, chamados por ele de "quanta de luz".

Introdução histórica – Da MQ a EPR

- 1913: Bohr redesenha o modelo atômico:



Fonte: CAIUSCA, 2019



Fonte: SANTOS, 2020

- 1916: Milikan confirma a teoria de Einstein para o Efeito Fotoelétrico;
- Dualidade onda-partícula ganha foco;
- 1925: Born e Jordan: Bases da mecânica matricial;

CAIUSCA, A. Modelo atômico de Rutherford, 2019. In: <<https://www.educamaisbrasil.com.br/>>. Acesso em: 20 ago 2020.

SANTOS, T. Modelo atômico de Bohr, 2020. In: <<https://www.educamaisbrasil.com.br/>>. Acesso em: 20 ago 2020.

Introdução histórica – Da MQ a EPR

- ▶ 1925: Dirac: estabelece uma ligação entre a MC e a MQ usando um formalismo 'algébrico';
- ▶ 1927: Schrödinger: $|\psi|^2$ como a densidade de carga elétrica
- ▶ 1927: De Broglie: o elétron é uma partícula com onda associada;
- ▶ 1927: Heisenberg: Mostrou o colapso da função de onda e apresentou as relações de incerteza;

Introdução histórica – Da MQ a EPR

- ▶ 1927: 5ª Conferência de Solvay:



Fonte: bastter.com

Introdução histórica – Da MQ a EPR

- ▶ 1927: 5ª Conferência de Solvay:
- ▶ Sobre o colapso da função de onda
 - ▶ Dirac afirma que "podemos dizer que a natureza escolhe qual dos ψ_n apropriado, uma vez que a única informação que a teoria dá é que a probabilidade de qualquer um dos ψ_n ser escolhido é $|C_n|^2$ " (tradução própria, SOLVAY, 1928, p. 262).
 - ▶ Bohr citou que não é possível definir grandezas complementares simultaneamente. Para ele, "um objeto quântico não pode ser inteiramente compreendido dentro de um 'quadro único', mas necessita de descrições mutuamente excludentes, como 'onda' ou 'partícula', que juntas se complementam para descrever o objeto" (PESSOA JR, 2006, p. 97).
 - ▶ Einstein ataca o Princípio da Incerteza, assim como faria 3 anos depois na Conferência de 1930;

Introdução histórica – Da MQ a EPR

- A interpretação de complementaridade, dada por Bohr, prevalece, também conhecida como a "interpretação ortodoxa".
- 1932: Von Neumann mostrou que a TVO não reproduz todos os resultados da MQ;
- 1935: Einstein-Podolsky-Rosen questionam "a descrição da quântica da realidade física pode ser considerada completa?";
- 1935: Bohr tenta retrucar;
- 1964: John Bell traz uma resposta ao Paradoxo de EPR.

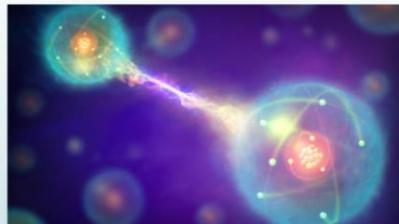
Contexto teórico - EPR

- (1) a descrição da realidade quântica dada pela função de onda não é completa; ou
- (2) quando os operadores correspondentes às duas quantidades físicas não comutam, estas não podem ter realidades simultâneas.

Contexto teórico - EPR

- Há interação apenas entre $t = 0$ e $t = T$;

Imagem 2 – Interação entre dois sistemas



Fonte: thoughtco.com

Contexto teórico - EPR

- Conforme Einstein, Podolsky e Rosen (1935, p. 779) “não podemos, no entanto, calcular o estado em qualquer um dos sistemas após a interação”. Para isso, é necessário fazer uso de medidas em um processo de “redução do pacote de onda”.

Contexto teórico – EPR

- Logo, “é possível atribuir duas funções de onda diferentes [...] para a mesma realidade (o segundo sistema após a interação com o primeiro)” (tradução própria, EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN, 1935, p. 779).

Contexto teórico – EPR

- EPR (1935) chega a conclusão da não-comutatividade

$$PQ - QP = \frac{h}{2\pi i}$$

$$PQ \neq QP$$

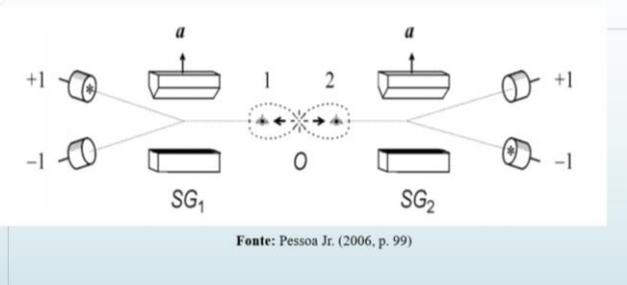
Contexto teórico – EPR

- Relembrando as hipóteses...
- (1) a descrição da realidade quântica dada pela função de onda não é completa; ou
- (2) quando os operadores correspondentes às duas quantidades físicas não comutam, estas **não podem ter realidades simultâneas**.
- EPR (1935) deixam em aberto se existe ou não uma descrição plausível e afirmam acreditar que uma delas seja possível.

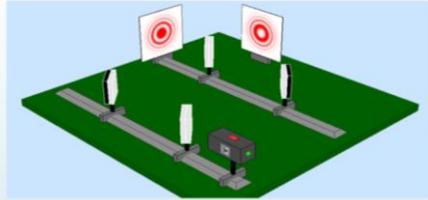
O experimento mental: Analogia – emaranhamento quântico



O experimento mental



O interferômetro de Mach-Zehnder



Fonte: OSTERMANN, F. *Interferômetro de Mach-Zehnder*. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda/>. Acesso em: 09 mar 2022.

Principais Referências

- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: **Physical Review**. v. 47, 1935, p. 777-780.
- PESSOA JR, Osvaldo. Introdução histórica à teoria quântica, aos seus problemas de fundamento e às suas interpretações. In: **Caderno de Física da UEFS**. v. 04, 2006. p. 89-114.
- SOLVAY, Institut International de Physique. Discussion Générale des Idées Nouvelles Émises. In: **Électrons et Photons - Rapports et Discussions de Cinquième Conseil de Physique**. Paris. Gauthier-Villars, 1928. p. 262.