



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

CET0379 – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO III

Lucas Queiroz Galvão

**INSERÇÃO DA COMPUTAÇÃO QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO:
POSSIBILIDADES E DESAFIOS A PARTIR DE UMA MATRIZ ORIENTADORA**

BARREIRAS

DEZEMBRO / 2023

LUCAS QUEIROZ GALVÃO

**INSERÇÃO DA COMPUTAÇÃO QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO:
POSSIBILIDADES E DESAFIOS A PARTIR DE UMA MATRIZ ORIENTADORA**

Monografia apresentada como requisito à nota final no componente curricular CET0379 – Trabalho De Conclusão De Curso III, semestre 2023.2, sob a orientação da professora Dra. Suiane Ewerling da Rosa.

Barreiras

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

G182 Galvão, Lucas Queiroz.

Inserção da computação quântica no ensino médio: possibilidades e desafios a partir de uma matriz orientadora. / Lucas Queiroz Galvão – 2023.

72f.

Orientador: Prof. Dr. Suiane Ewerling da Rosa.

Monografia (Graduação) – Licenciatura em Física. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2023.

1. Física Moderna. 2. Computação Quântica. 3. Ensino Médio. I. Rosa, Suiane Ewerling da. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 006.3843

Biblioteca Central de Barreiras - UFOB



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
COLEGIADO DO CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA
Campus Edgard Santos, Estrada do Barroco, Morada Nobre
CEP 47.800-000, (77) 3614-3120

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos treze dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e três, às nove horas realizou-se no Auditório Dois do Prédio Um da Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **“INSERÇÃO DA COMPUTAÇÃO QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: POSSIBILIDADES E DESAFIOS A PARTIR DE UMA MATRIZ ORIENTADORA”**, do discente **Lucas Queiroz Galvão**, como requisito de avaliação do Componente Curricular Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Licenciatura em Física. A Comissão Examinadora foi composta pelos docentes: Dra. Suiane Ewerling da Rosa (Orientadora), Dr. Clebson dos Santos Cruz (CCET – UFOB) e Dr. Lucas Guimarães Barros (CCET - UFOB). Estiveram presentes à sessão demais professores, alunos e a comunidade. Sob a presidência da Profª. Dra. Suiane Ewerling da Rosa foi iniciada a sessão com uma apresentação oral do discente, seguida da arguição da Comissão Examinadora. Após arguição, os membros da Comissão Examinadora se reuniram e avaliaram o discente, atribuindo nota dez, correspondente à média aritmética das notas atribuídas por cada um dos membros da Comissão Examinadora, sendo o discente **Lucas Queiroz Galvão APROVADO com DISTINÇÃO**. Nada mais havendo a constar, foi lavrada a presente ata que vai assinada pelos presentes. Barreiras (BA), 13 de dezembro de 2023.

Documento assinado digitalmente
 **SUIANE EWERLING DA ROSA**
Data: 14/12/2023 09:16:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Suiane Ewerling da Rosa
Presidente da Comissão Examinadora e Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **CLEBSON DOS SANTOS CRUZ**
Data: 15/12/2023 15:33:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Clebson dos Santos Cruz
Membro da Comissão Examinadora

Assinado digitalmente por:
Lucas Guimarães Barros
(Universidade Federal do Oeste da Bahia)

Lucas Guimarães Barros
Membro da Comissão Examinadora

RESUMO

A realidade atual se mostra complexa em termos de desenvolvimento científico e tecnológico, exigindo dos cidadãos conhecimentos científicos formulados ainda nas últimas décadas, seja para interpretar essa realidade, seja para exercer um papel ativo e participativo nas decisões referentes à Ciência e Tecnologia. No contexto do ensino da Física, as pesquisas demonstram que os conteúdos atrelados à Física Moderna e Contemporânea pouco tem sido trabalhados no ensino médio, tendo em vista a atual desatualização curricular e falta de materiais destinados à educação básica, podendo implicar em um não alcance do perfil de formação crítica. Complementar a isso, mesmo os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea descritos nesses trabalhos são, em geral, referentes aos primórdios da Mecânica Quântica, que ainda se mostram insuficientes para essa compreensão. Neste trabalho, busca-se sinalizar diferentes alcances formativos provenientes de práticas de ensino de Computação Quântica no ensino médio, tendo em vista as possibilidades de se explorar temas mais recentes da ciência e tecnologia, além da sua atual relevância para a comunidade científica e industrial. Logo, as reflexões presentes nesta pesquisa derivam de uma identificação abrangente dos diferentes enfoques adotados nas práticas de ensino de Computação Quântica para o ensino médio, considerando três dimensões distintas: Conceitual, Instrumental e Sociocientífica. No Enfoque Conceitual, destaca-se a articulação dos conceitos da Computação Quântica. O Enfoque Instrumental, associado às habilidades procedimentais, abrangendo desde o uso de Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação até a de algoritmos quânticos. O Enfoque Sociocientífico vincula-se à formação de atitudes e valores, com abordagem em diferentes etapas. A partir desses enfoques, construiu-se uma matriz de orientação, resultando em três objetivos de aprendizagem: Aprendizagem para a Informação, Aprendizagem para Questionamento e Aprendizagem para Tomada de Decisões. A caracterização proposta não visa apenas classificar, mas sim proporcionar uma compreensão abrangente das abordagens, sendo uma ferramenta orientadora para escolhas, direcionamentos e reflexões sobre práticas de ensino em Computação Quântica no ensino médio. Essa matriz busca reconhecer a diversidade de contextos e objetivos, sendo um instrumento relevante para futuras investigações sobre a interseção entre práticas educacionais e discursos científicos.

Palavras-chave: Física Moderna e Contemporânea; Computação Quântica; Ensino Médio; Matriz de Orientação.

ABSTRACT

A current reality presents itself as complex in terms of scientific and technological development, demanding from citizens scientific knowledge formulated in the last decades, whether to interpret this reality or to play an active and participatory role in decisions related to Science and Technology. In the context of Physics education, research shows that content related to Modern and Contemporary Physics has been little addressed in high school, considering the current outdated curriculum and the lack of materials for basic education. This can result in a failure to achieve a critical training profile. Additionally, even the content of Modern and Contemporary Physics described in these works generally refers to the early days of Quantum Mechanics, which are still insufficient for this understanding. In this work, we seek to indicate different formative scopes arising from Quantum Computing teaching practices in high school, considering the possibilities of exploring more recent science and technology themes, as well as their current relevance to the scientific and industrial community. Therefore, the reflections in this research derive from a comprehensive identification of different approaches adopted in Quantum Computing teaching practices for high school, considering three distinct dimensions: Conceptual, Instrumental, and Socioscientific. In the Conceptual Approach, the articulation of Quantum Computing concepts stands out. The Instrumental Approach, associated with procedural skills, covers everything from the use of Digital Information and Communication Technologies to quantum algorithms. The Socioscientific Approach is linked to the formation of attitudes and values, with an approach at different stages. Based on these approaches, an orientation matrix was built, resulting in three learning objectives: Learning for Information, Learning for Questioning, and Learning for Decision Making. The proposed characterization aims not only to classify but also to provide a comprehensive understanding of the approaches, serving as a guiding tool for choices, directions, and reflections on Quantum Computing teaching practices in high school. This matrix seeks to recognize the diversity of contexts and objectives, being a relevant instrument for future investigations into the intersection between educational practices and scientific discourses.

Keywords: Modern and Contemporary Physics; Quantum Computing; High School; Guidance Matrix.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACT	Alfabetização Científica e Tecnológica
ATD	Análise Textual Discursiva
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CC	Ciência da Computação
C&T	Ciência e Tecnologia
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
CQ	Computação Quântica
EM	Ensino Médio
FMC	Física Moderna e Contemporânea
MQ	Mecânica Quântica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	7
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
SEÇÃO 1: A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio	11
SEÇÃO 2: Aspectos conceituais da Computação Quântica para o Ensino Médio	16
SEÇÃO 3: Alfabetização Científica e Tecnológica: um caminho para a inserção da Computação Quântica no Ensino Médio	21
CAPÍTULO 3: METODOLOGIA	26
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
Seção 1: Descrição do <i>corpus</i> de análise	34
Seção 2: Enfoque Conceitual	40
Seção 3: Enfoque Instrumental	44
Seção 4: Enfoque Sociocientífico	47
Seção 5: Matriz Orientadora para o Ensino de Computação Quântica no Ensino Médio	50
CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICE I	64

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX, o mundo vem passando por um acelerado avanço científico e tecnológico, com profundas demandas e implicações sociais, científicas, culturais, industriais e econômicas em toda a humanidade. Saber se posicionar perante tais questões tem o potencial de possibilitar ao cidadão interpretar e transformar a sua realidade a partir do conhecimento científico articulado com outros campos (Valladares, 2021). Logo, torna-se indispensável a inserção de discussões na Educação Básica que propiciem uma formação capaz de possibilitar a participação dos estudantes em tais questões.

Nesse contexto, diversas são as pesquisas que discutem a problemática da falta de inserção de tópicos contemporâneos no Ensino de Ciências no âmbito da Educação Básica. No Ensino Médio (EM), especificamente na disciplina de Física, tem-se, por exemplo, a pouca inserção de tópicos relacionados à Física Moderna e Contemporânea¹ (FMC), em especial à Mecânica Quântica (MQ) (Ostermann; Moreira, 2000; Pena, 2006; Monteiro; Nardi; Filho, 2009). Essa inserção se torna indispensável considerando que uma grande parcela dos dispositivos atuais, como aparatos digitais, sensores e a própria internet, não podem ser explicados a partir das leis da Física Clássica, mas pela FMC.

Partindo do pressuposto que uma grande parcela dos estudantes não irá seguir em profissões que discutam esses aspectos, o EM é, em muitas ocasiões, o único contato formativo deles com esses conhecimentos (Terrazzan, 1992), o que torna os objetivos do Ensino de Ciências, mais particularmente o Ensino de Física, distantes da ideia de uma formação que propicie uma aprendizagem mais relevante, participativa e, acima de tudo, crítico-reflexiva (Moreira, 2018).

Em meio a essas demandas, surgem também pesquisas científicas referentes a práticas e propostas que buscam a inserção da FMC no EM, discutindo suas potencialidades e limitações (a exemplo de: Moreira, 2004; Webber, 2006; Pinheiro, 2011; Biazus; Rosa, 2016). Entretanto, apesar do esforço, os currículos de Física da Educação Básica ainda são extremamente desatualizados, restringindo-se a discussões do início do século XX (Ostermann; Moreira, 2000; Pena, 2006; Moreira, 2018). Assim, os tópicos discutidos nas práticas pedagógicas se reduzem, em sua maioria, a conteúdos da Física semi-clássica,

¹ O termo corresponde a um período a Física em que foram rompidos antigos paradigmas associados à compreensão do espaço-tempo e do mundo atômico e subatômico, perdurando até os dias atuais (Caruso, Oguri, 2016). Esses rompimentos estão associados à Teoria da Relatividade e à Mecânica Quântica. Neste trabalho, a ênfase será dada ao segundo caso.

ignorando tópicos recentes e com grande poder de impacto na humanidade, podendo estimular o engajamento e participação dos cidadãos na tomada de decisões futuras associadas a eles.

Dentre esses tópicos, a Computação Quântica (CQ) ganha destaque atualmente devido ao grande interesse da comunidade científica em explorar novas possibilidades de produção científica, tecnológica e industrial (Nielsen; Chuang, 2011). Contudo, se tópicos básicos da FMC são pouco explorados nos currículos de Física do EM, a CQ é praticamente inexistente. Em um levantamento realizado no *Google Scholar*², no contexto brasileiro, foram encontrados somente dois trabalhos associados a práticas de implementação da CQ no EM, ambos dos mesmos autores (Cardoso; Ferrari; Almeida, 2011; 2020). Se esse é um dos tópicos de maior interesse atualmente para a comunidade científica (Lars, 2018), por que recebe pouca ou nenhuma atenção nos currículos de Física do EM no Brasil?

Para a compreensão de aspectos associados a essas indagações, faz-se necessária uma breve discussão acerca da CQ. De modo geral, essa é uma linha de pesquisa que surgiu em meados do século XX. Entretanto, ainda que tópicos como o paradoxo EPR, a inequação de Bell e o próprio surgimento da teoria da informação quântica já serem amplamente conhecidos pela comunidade científica da época, apenas em 1980 a CQ começou a se popularizar a partir de um conjunto de palestras realizadas por Richard Feynman, em que provêm uma base teórica e um modelo universal para a construção de um computador quântico, permitindo uma melhor descrição de sistemas quânticos se comparado aos computadores clássicos (Singh; Singh, 2016). Atualmente, empresas amplamente conhecidas têm investido milhões de dólares na construção de computadores quânticos reais. Inclusive, atualmente a IBM tem liberado o acesso remoto de alguns desses computadores para usuários do mundo inteiro a partir do projeto IBM Quantum Experience (IBM, 2022).

Entretanto, apesar de tais avanços, os computadores quânticos existentes ainda são limitados por conta do alto ruído e desconectividade dos qubits. Nesse caso, parte dos esforços da CQ tem sido destinada à programação a partir do uso de simuladores para a implementação de algoritmos quânticos (Heim, 2020). Alguns desses algoritmos têm mostrado resultados promissores frente aos algoritmos clássicos, tais como o algoritmo de fatoração de números inteiros (Shor, 1994), de busca em uma lista não estruturada (Grover, 1996) e de solução de sistemas de equações lineares (Harrow; Hassidim, 2008). Todos eles mostram uma aceleração com relação aos clássicos, seja ela exponencial, quadrática ou polinomial.

² <https://scholar.google.com.br/?hl=pt>

Nesse sentido, considerando o destaque da CQ no atual cenário de produção científica e tecnológica, somado à ausência de tópicos contemporâneos da FMC no EM, a sua abordagem denota potencialidades para a inserção no EM. Além disso, outro ponto que dialoga com tal importância tange justamente às orientações presentes na Base Nacional Comum Curricular³ (BNCC), uma vez que ela traz competências e habilidades consideradas essenciais para a formação de cidadãos ativos e capazes de inseri-los no atual cenário global e nacional. No capítulo referente às Ciências da Natureza, as três competências trazidas denotam tais aspectos, em especial a terceira: “investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais [...]” (Brasil, 2018). Logo, torna-se explícita a necessidade de inserção de novos tópicos das ciências no EM, a exemplo da CQ, conforme defendido ao longo deste trabalho.

Entretanto, cabe destacar que muitas são as dificuldades em se implementar a CQ no EM, assim como o caso da FMC. Em termos de pesquisa na área, por exemplo, os trabalhos que discutem a inserção da CQ para o EM no currículo de Física das escolas brasileiras são praticamente escassos, dificultando o delineamento das limitações e potencialidades deste tópico, considerando aspectos específicos do contexto educacional brasileiro, além da própria falta de material didático. Em virtude disso, o *locus* de pesquisa sobre o objeto de estudo abordado foi ampliado para revistas internacionais de língua inglesa. No levantamento realizado a partir da base de dados Scholar, 14 (quatorze) trabalhos foram encontrados com o tema CQ para o EM, o que demonstra um relativo interesse das pesquisas internacionais se comparado ao cenário brasileiro, ainda que o seu número seja reduzido quando comparado a outros temas de pesquisa da área.

Ainda sobre esses trabalhos, cabe salientar que uma parcela considerável deles tem uma ênfase quase exclusiva em aspectos referentes à aprendizagem conceitual dos conteúdos da CQ, ignorando aspectos procedimentais e atitudinais, considerando as dimensões do conteúdo definidas por Zabala (2015). Sabe-se que reduzir o Ensino de Física a apenas ensinar conceitos da Física é limitante em termos de formação cidadã crítica e reflexiva, conforme posicionamento assumido neste trabalho. Neste sentido, é preciso se pensar em um ensino de CQ que incorpore aspectos alinhados com as discussões da Alfabetização Científica

³ O intuito do trabalho não é aprofundar ou defender a BNCC, mas apontar caminhos para inserção de tópicos relevantes da Ciências/Física, tendo em vista a influência do documento no atual cenário educacional.

e Tecnológica (ACT), que propicie um posicionamento crítico dos estudantes frente aos problemas da atualidade (Silva; Sasseron, 2021).

Complementar a isso, destaca-se que o presente trabalho também possui como *corpus* de análise práticas educativas de abordagem da CQ para estudantes do EM por meio de um projeto de Iniciação Científica Júnior, bem como oficinas realizadas em escolas da cidade de Barreiras (BA), em que foram trabalhados aspectos que visem uma formação alinhada a propósitos de uma ACT mais significativa. No entanto, cabe sinalizar que a análise da prática não é definida como objeto central de estudo, mas busca-se traçar possibilidades de uma inclusão da CQ nos currículos de Física do EM a partir dos resultados coletados.

Discutidas as considerações acerca da inserção de tópicos da CQ para o EM, a questão-foco do presente trabalho é pensada da seguinte maneira: quais alcances formativos as práticas de ensino de CQ para o EM podem promover, considerando as diferentes dimensões presentes em uma formação cidadã crítico-reflexiva? Com tal questão, objetiva-se explorar potencialidades e limitações presentes nas práticas de ensino da temática.

Para o alcance desse objetivo, são delineados três objetivos específicos: (i) discutir questões referentes à importância do ensino de tópicos recentes da FMC, mais particularmente da CQ, para a formação crítica de estudantes do EM; (ii) identificar os objetivos formativos presentes no processo de ensino-aprendizagem de diferentes práticas de ensino de CQ no EM considerando o *corpus* de pesquisa do trabalho; (iii) elaborar materiais de referência para a área a partir das análises realizadas.

Considerando esses objetivos, o trabalho é construído a partir de uma abordagem qualitativa, de cunho bibliográfico e interventivo, de dados associados a trabalhos que discutem o tema. Portanto, busca-se contribuir com a área de Ensino de Ciências, em especial o Ensino de Física, à medida em que discute questões de cunho epistemológico e praxiológico a respeito da inserção da CQ no EM.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A desatualização curricular referente ao cenário educacional brasileiro tem se mostrado um dos maiores problemas para o ensino da Física atualmente. Como já discutido anteriormente, faz-se necessária a inclusão de conteúdos mais recentes da Física nesses currículos de modo a superar algumas das limitações trazidas por essa problemática. No caso da CQ, para a sua inserção de forma dialogada com uma formação crítica-reflexiva dos estudantes, é necessário um aporte teórico em trabalhos que discutam a inserção da FMC no EM, a importância da atualização curricular, a promoção de uma ACT com propósitos formativos ampliados, além de práticas pedagógicas sobre CQ e seus aspectos conceituais.

Nesse sentido, a fundamentação teórica foi pensada em três seções que discutem esses elementos, a saber: 2.1) a Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio; 2.2) Aspectos conceituais da Computação Quântica para o Ensino Médio, e 2.3) Alfabetização Científica e Tecnológica como possibilidade de inserção da Computação Quântica no Ensino Médio. Na primeira seção, serão apresentadas as discussões da área de EF relacionadas ao atual cenário da FMC no EM. Na segunda sessão, serão apresentados ao leitor os principais conceitos da CQ. Por fim, serão discutidos aspectos da ACT como um caminho para a inserção da CQ no EM de forma mais significativa.

SEÇÃO 1: A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio

O atual cenário referente ao ensino da Física nas escolas brasileiras tem se mostrado estagnado em termos de conteúdos abordados no EM, que ainda estão fortemente associados aos projetos internacionais trazidos na segunda metade do século passado (Silva; Arengchi; Lino, 2013). Essa desatualização ignora aspectos referentes ao desenvolvimento científico e tecnológico atual, intimamente relacionado às transformações sociais, culturais, econômicas e ambientais da humanidade, e limita os conceitos da Física a tópicos anteriores ao século XIX (Pena, 2006; Moreira, 2018). Com a ausência de discussões sobre a FMC no EM, a aprendizagem dos conteúdos da Física se torna ineficiente em termos de uma ACT capaz de promover uma formação cidadã crítica-reflexiva, participativa e contextualizada com a realidade (Terrazzan, 1992; Ostermann; Moreira, 2000; Pena, 2006; Gerbassi, 2007; Sabino; Pietrocola, 2016).

De forma atenta a essas problemáticas, alguns trabalhos da área de Ensino de Física discutem as implicações da falta de inserção da FMC no EM e propõem caminhos para que isso ocorra. Como grande marco dessas pesquisas, Ostermann e Moreira (2000) destacam os principais pontos discutidos na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física,

ocorrida em 1988, sobre a importância da FMC no EM: 1) “despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano”; 2) desenvolver o interesse e entusiasmo dos estudantes para a Física a partir da inserção de tópicos mais próximos de sua realidade, atraindo jovens para a carreira científica; 3) “é mais divertido para o professor ensinar tópicos que são novos”, o que permite um maior entusiasmo dos professores para o ensino da Física; 4) “Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata”, mas as pesquisas também denotam tais dificuldades na Física Clássica, o que não pode ser considerado um fator inteiramente limitante (p. 24). Porém, mais de 30 anos após a conferência, tais tópicos são ainda constantemente retomados pelas atuais pesquisas em EF, evidenciando a pouca mudança no cenário brasileiro com relação ao ensino desses conteúdos.

Ainda sobre o trabalho de Ostermann e Moreira (2000), outra questão de destaque está relacionada com as pesquisas referentes ao interesse dos professores e estudantes quanto aos temas da Física. Esses tópicos se associam, em geral, à relatividade restrita, partículas elementares, teoria quântica, astrofísica, Big Bang, estando intimamente ligados à própria FMC. Ou seja, os tópicos que mais despertam o interesse dos professores e estudantes do EM são os menos trabalhados nas aulas de Física. Como afirma Moreira (2021), de forma dialógica com o trabalho de Renninger, Nieswandt e Hidi (2015), “interesse existe em uma relação particular entre aprendiz e seu entorno” (p. 6) e, nas etapas iniciais do processo ensino-aprendizagem, despertar o interesse dos estudantes se torna essencial “para fazer conexões entre o mundo real e as tarefas de aprendizagem” (p. 6); apenas após tais conexões é que eles estão prontos para lidar com conteúdos mais complexos. No entanto, como também sinaliza o autor, despertar tal interesse se mostra o maior desafio do atual ensino da Física, o que torna o fato de os conteúdos da FMC serem ignorados no EM um possível agravante.

Em um recorte específico do contexto brasileiro, Siva, Arengi e Lino (2013), organizam em quatro categorias as justificativas dos trabalhos acadêmicos para a inserção da FMC no EM: A) A inserção de FMC no EM é importante para a compreensão das tecnologias da atualidade; B) A necessidade de atualização curricular do EM; C) A FMC representou uma mudança de paradigma da Física e essa noção de desenvolvimento das ciências se faz necessária no EM; D) A FMC como subsídio à compreensão e crítica das questões atuais que envolvem ciência, tecnologia, sociedade e ambiente. Cabe sinalizar que tais justificativas se aproximam dos pontos discutidos anteriormente referentes à III Conferência Interamericana

sobre Educação em Física, o que reforça a desatualização curricular predominante no ensino da Física.

No que concerne à categoria A, os autores ressaltam que essa é a justificativa que mais aparece nos trabalhos. De fato, essa é uma relação mais direta visto que o desenvolvimento tecnológico está fortemente atrelado ao desenvolvimento científico, a exemplo de celulares e computadores, a Internet e usinas nucleares (Silveira; Bazzo, 2006). Esses tópicos não podem ser explicados por meio da Física Clássica, mas pelos conceitos da FMC, de modo que discussões a seu respeito se tornam imprescindíveis no EM para a formação de sujeitos que saibam interpretar a sua realidade e se posicionar perante ela por meio do conhecimento científico contextualizado com outros saberes (Pena, 2006).

Já na categoria B, a necessidade de atualização dos currículos toca questões políticas e identitárias que dialogam de maneira direta com a formação dos estudantes, sendo necessária uma discussão mais aprofundada acerca do campo curricular. Como aporte para essas discussões, é possível se pensar no currículo a partir das três teorias estruturadas por Silva (1996): teoria curricular tradicional, teoria curricular crítica e teoria curricular pós-crítica. Essas teorias se relacionam, em geral, com as demandas da sociedade com relação à formação de cidadãos para atender às suas necessidades, que estão fortemente atreladas aos desejos da classe dominante. Na teoria tradicional, há um silenciamento de questões associadas à hierarquização de conteúdos, tendo foco em formar cidadãos que atendam às demandas do capitalismo; na teoria crítica, esse silenciamento é rompido a partir do questionamento da hierarquização dos conteúdos, atentando-se às imposições da classe dominante; enquanto que, na teoria pós-crítica, esse questionamento não se reduz apenas à opressão da classe dominante, mas estruturas de poder em geral, compreendendo algumas formas de dominação como mais opressoras que outras (Silva, 1996).

Com vista ao exposto, é possível traçar relações entre as teorias curriculares e os objetivos referentes à formação dos estudantes, uma vez que o currículo dialoga diretamente com esses aspectos. No campo da pesquisa em Ensino de Ciências, os trabalhos de Kreuger e Ramos (2017), apoiados em Westheimer e Kahne (2004), fazem uma categorização de três possíveis perfis de formação dos estudantes referente ao EC: o cidadão individualmente responsável, em que se preocupa em utilizar o conhecimento visto na escola para tarefas que visem o crescimento individual, particularmente o profissional; o cidadão participativo, em que se posiciona no mundo de forma crítica a partir do conhecimento aprendido, questionando a estrutura de poder imposta pela classe dominante; e o cidadão orientado para a justiça, que

segue uma característica próxima do cidadão participativo quanto a se posicionar no mundo, mas enxerga essa estrutura de poder como plural, buscando uma emancipação genuína.

Nesse sentido, é notória a aproximação entre a teoria tradicional e o perfil de formação cidadã individualmente responsável, pois os objetivos formativos da teoria se relacionam com as atitudes e concepções do perfil em termos de ocupação para vida adulta; entre a teoria crítica e o perfil de formação cidadã participativa, visto que o desenvolvimento de uma percepção crítica da realidade presente nesse perfil se associa aos objetivos formativos dessa teoria; e a teoria pós-crítica e o perfil de formação cidadã orientada para a justiça em termos de empoderamento perante as diversas formas de opressão. Essas aproximações tornam mais direta a relação entre a organização do conteúdo e os objetivos formativos presentes no contexto educacional do ensino da Física.

Com vista a essas discussões, somadas às inquietações da pesquisa em EF com relação à inserção da FMC no EM, é possível identificar sequer o alcance dos objetivos da teoria tradicional e, conseqüentemente, de uma formação que se aproxima do cidadão individualmente responsável. De fato, para a compreensão do mundo atual, no sentido de desenvolvimento científico e tecnológico, conceitos da Física anteriores ao século XIX são insuficientes, tornando-se necessária uma atualização curricular capaz de proporcionar minimamente competências e habilidades que atendam às demandas do liberalismo (Kreuger; Ramos, 2017). Se tais concepções sequer são alcançadas, é notório que os objetivos da teoria curricular crítica, que dialogam com uma formação participativa, se distanciam gravemente do atual ensino da Física, enquanto que os objetivos da teoria pós-crítica, dialogada com uma formação orientada para a justiça, são praticamente intangíveis.

Em termos de discussões da área, o atual ensino da Física nas escolas brasileiras se aproxima do que Moreira chama de ensino mecanicista (2018; 2021) e Auler de ensino propedêutico (2007): centrado no professor, reprodutor de técnicas/metodologias pré-definidas, pouco crítico-reflexivo, estático em termos de abordagem do conteúdo, silenciador do contexto ao qual está inserido e ineficaz no que se refere à aprovação efetiva dos estudantes. Enquanto Moreira elenca a desatualização dos currículos como um dos principais desafios do ensino da Física (2021), Auler o caracteriza como o mais agravante (2007), argumentando que mudanças metodológicas são insuficientes para a superação das problemáticas presentes no ensino da Física, sendo preciso ir na raiz do problema, ou seja, repensar o currículo.

Retomando as discussões de Siva, Arengi e Lino (2013) para a categoria C, os trabalhos explicitam também a importância de compreender discussões de cunho epistemológico a partir do estudo da FMC no EM. Como aporte para tais discussões, faz-se necessária a compreensão de aspectos associados à História e Filosofia da Ciência (HFC), de modo a entender a Física como um empreendimento humano, seus impactos na cultura, sua não-linearidade, a importância do erro epistemológico, além de romper com a concepção de uma ciência isolada do seu contexto histórico e social (Matthews, 1995). No campo da pesquisa em Ensino de Física, os trabalhos mostram ser possível trazer esses elementos para as aulas de Física a partir da abordagem da FMC no EM, contextualizando as descobertas e formulações recentes com a realidade do estudante (Paulo, 2006; Machado, 2006; Lino, 2010).

Como última categoria (D), há uma relação com a inserção dos estudantes em discussões que impactem direta ou indiretamente a sua vida, tendo em vista que discussões associadas a C&T. No Ensino de Ciências, trabalhos com abordagem CTS demonstram diversas potencialidades para a aprendizagem dos estudantes, seja para tópicos de cunho conceitual, seja para o desenvolvimento de valores e posicionamento crítico (Strieder; Kawamura, 2017). Assim, aprender os conceitos da FMC no EM está para além de apenas assimilação de conteúdo, mas também uma possibilidade de se posicionar no mundo criticamente perante as novas tecnologias e demandas atuais (Terrazzan, 1992).

As discussões dessas justificativas presentes no trabalho de Silva, Arengi e Lino (2013) promovem a reflexão a respeito do real motivo da não inserção da FMC no EM, que atualmente enfrenta duas grandes dificuldades: problemas presentes na formação de professores e a falta – ou não alcance – de materiais didáticos destinados à Educação Básica. Quanto ao primeiro ponto, os trabalhos da área mostram que a FMC é inserida na matriz curricular dos cursos de Física próximo – ou exatamente – ao final do curso. Assim, os licenciandos veem inicialmente apenas conteúdos associados à Física Clássica, ou em outras palavras, anteriores ao século XIX (Araújo; Zago, 2016; Sabino; Pietrocola, 2016). Por conseguinte, se há uma inserção da FMC apenas ao final do curso, não é possível um diálogo consistente entre as práticas de ensino e esses tópicos, implicando em uma possível deficiência na formação inicial dos professores para se trabalhar com a FMC no EM. Outrossim, cabe destacar também a própria abordagem de conteúdos referentes ao campo curricular, que, se ignorados os aspectos políticos e de identidade presentes nele, acabam contribuindo para uma percepção de currículo estático e inflexível.

Em se tratando da dificuldade associada à falta – ou não alcance – de materiais didáticos destinados à Educação Básica, esse é um tópico amplamente abordado nos trabalhos sobre a inserção da FMC no EM (Ostermann; Moreira, 2000; Gerbassi, 2007; Sabino; Pietrocola, 2016). Em um trabalho de revisão de literatura sobre a inserção da MQ no EM, Silva e Almeida (2011) apontam que uma das maiores dificuldades apresentadas nos trabalhos é justamente a sua ausência no livro didático, assim como a falta de materiais paradidáticos adequados para o público do EM. Concomitantemente a isso, cabe destacar também o não alcance dos (poucos) materiais desenvolvidos nas PEF na Educação Básica, tendo em vista o relativo distanciamento da prática docente com relação às pesquisas realizadas na área (Pena, 2006).

Para finalizar, destaca-se que, ainda que existam limitações e desafios associados à inserção da FMC no EM: os trabalhos da área demonstram potencialidades frente às problemáticas presentes no EM a partir dessa inserção. No entanto, há ainda outra questão nas propostas e práticas analisadas no presente trabalho: os tópicos abordados são, em geral, ainda associados a conteúdos referentes à Relatividade Restrita ou aos primórdios da MQ, com as discussões mais atuais sendo praticamente ignoradas (Greca; Moreira, 2001; Sabino; Pietrocola, 2016). Como exemplo, é possível citar a ausência da CQ, que é justamente um dos tópicos de maior interesse para a comunidade científica atualmente, visto que as possíveis vantagens atreladas ao seu uso são de grande interesse para pesquisas e aplicações mercadológicas e industriais. Logo, trazer discussões como essa para o EM é inserir o estudante no cenário de discussão a respeito do seu impacto social, econômico, político e cultural na humanidade.

SEÇÃO 2: Aspectos conceituais da Computação Quântica para o Ensino Médio

A CQ é uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida desde a segunda metade do século XX de forma concomitante aos avanços da MQ e Computação Clássica (Singh; Singh, 2016). Assim, apesar de se popularizar apenas no século XXI, muitas foram as discussões acerca do tema, suas possibilidades de aplicação e resultados teóricos obtidos ainda no século passado. Tais discussões se associam às novas descobertas da MQ atreladas a sistemas de dois níveis, juntamente com as limitações inerentes à Computação Clássica (Nielsen; Chuang, 2011). Para compreender a origem e conceitos associados a ela, faz-se necessária uma breve introdução em tópicos tanto da MQ, quanto da Ciência da Computação (CC).

Referente à MQ, sua origem é amplamente associada à Hipótese de Planck, que, na tentativa de resolver o problema da “catástrofe do ultravioleta”⁴, tratava a energia de radiação de um corpo negro como quantizada. A hipótese permitiu a obtenção de resultados teóricos condizentes com as observações experimentais e abriu espaço para diversas discussões associadas aos primórdios da MQ, tais como o Efeito Fotoelétrico, o Átomo de Bohr, Experimento de Stern–Gerlach, Efeito Compton e Hipótese de De Broglie (Eisberg; Resnick, 1979; Caruso; Oguri, 2016). Dentre esses resultados, o mais notório para a CQ é o Experimento de Stern–Gerlach, que prova a existência de sistemas de dois níveis na natureza, conhecidos como qubits (Nielsen; Chuang, 2011). No entanto, a teoria quântica passa a ter um tratamento generalizado apenas em 1926 com a formulação da Equação de Schrödinger, capaz de descrever o comportamento do estado quântico de um sistema físico.

Em meio a esse contexto, os resultados da MQ começam a se relacionar de forma mais direta com a CQ a partir da consolidação da Teoria da Informação Quântica proposta por Ingarden em 1975, ao afirmar que a teoria quântica deveria ser generalizada para a teoria geral da informação de Shannon (Singh; Singh, 2016). Já em 1980, Feynman e Paul Benioff provêm uma base teórica e modelo universal para a construção de um computador quântico, o que veio a se tornar o que é considerado atualmente o maior marco inicial da CQ (Singh; Singh, 2016). Eles propuseram que esses computadores poderiam oferecer uma melhor descrição de sistemas quânticos se comparado aos computadores clássicos, uma vez que operam a partir das “leis do mundo quântico”.

Na contemporaneidade, a MQ já tem se mostrado uma teoria consolidada com um conjunto de postulados formulados de forma empírica. Segundo Nielsen e Chuang (2011), alguns desses postulados são de suma importância para a compreensão posterior de determinados conceitos da QC, a saber: (I) um sistema quântico é inteiramente descrito por um vetor de estado complexo, associado ao espaço de Hilbert; (II) a evolução de um sistema quântico fechado é descrita por uma transformação unitária; (III) medidas quânticas são descritas por uma coleção de operadores de medidas; (IV) o espaço de estados de um sistema quântico é descrito por um produto tensorial de vetores de estado. Cabe destacar que a MQ é descrita em termos de postulados por ser uma área com fortes bases experimentais (Caruso; Oguri, 2016).

⁴ Termo atribuído ao fato de os resultados teóricos referentes à distribuição espectral da radiação de corpo negro com relação aos seus comprimentos de onda não condizerem com os resultados experimentais obtidos para altas temperaturas (Eisberg; Resnick, 1979).

Em se tratando da CC, ainda que sua origem esteja fortemente atrelada à criação do ábaco na Antiguidade, os primeiros computadores eletrônicos tiveram relevante progresso apenas no período de guerras mundiais para a decodificação de informações secretas que eram transmitidas entre as diferentes bases militares (FILHO, 2007). Atualmente, esses computadores progrediram a ponto de ser possível carregá-los no bolso com uma tecnologia superior à dos computadores do século passado. Um computador também pode ser subdividido em diferentes níveis, que variam desde o nível mais alto – próximo do usuário – até o nível mais baixo – próximo da máquina –, a saber (mais alto ao mais baixo, respectivamente): circuitos eletrônicos, circuitos digitais, conjunto de instruções, sistema operacional, linguagem de montagem e linguagem orientada a problemas.

Como unidade básica da informação para a Computação Clássica presente no nível mais baixo, existem os *bits*, que podem assumir apenas valores binários, a exemplo do 0 ou 1, VERDADEIRO ou FALSO, LIGADO ou DESLIGADO, dentre outros. Na prática, esses *bits* são operados transistores, que, em conjunto com as portas lógicas, compõem circuitos computacionais que possibilitam a execução de algoritmos por meio de uma álgebra booleana⁵ (Sedra; Smith, 2004). Nesse caso, cada algoritmo tem um parâmetro que define a sua complexidade em termos de tempo de execução, conhecida por O . É interessante ressaltar que, ainda que existam algoritmos com as mesmas funções, eles podem ter complexidades diferentes a depender de como foi estruturado.

Para além disso, outro ponto de suma importância para a CC é a lei de Moore, formulada por Gordon Moore em 1965, em que realiza uma previsão de que a cada dois anos os microchips terão sua capacidade de processamento dobrada, tendo em vista a diminuição no tamanho dos transistores. No entanto, os dados atuais têm mostrado que essas previsões podem chegar ao fim por conta do limite na diminuição desses transistores, trazendo limitações futuras para a Computação Clássica, mesmo com o uso de supercomputadores (Nielsen; Chuang, 2011). Com isso, ela seria incapaz de acompanhar o progresso tecnológico para tarefas que exijam um alto grau de processamento ou um processamento muito rápido (Ain *et al.*, 2016).

Por outro lado, a CQ tem se tornado uma área consistente à medida em que resultados teóricos têm sido confirmados e novos computadores quânticos têm sido desenvolvidos. Esses resultados estão associados à aceleração trazida por esses computadores se comparados aos computadores clássicos, tendo em vista a unidade de informação básica da

⁵ Álgebra com operações binárias embasada em operações lógicas efetuadas apenas com os valores 0 e 1 (Fávero, 2011).

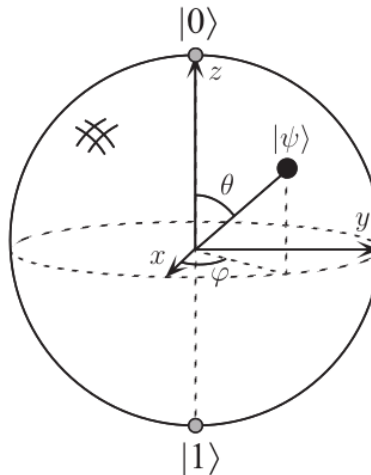
CQ: os qubits. Segundo Nielsen e Chuang (2011), enquanto os bits podem assumir apenas valores binários⁶ $|0\rangle$ e $|1\rangle$, os qubits podem assumir outros estados a partir de uma combinação linear de dois estados, conhecida como superposição:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1)$$

Ou seja, os qubits são, em teoria, um sistema quântico de dois níveis. De maneira ainda mais específica, esses estados são, na verdade, conhecidos como vetores complexos de estados bidimensionais, que obedecem a relação de normalização $\alpha^2 + \beta^2 = 1$, onde α e β são números complexos. À nível de elucidação, é possível visualizar o vetor de estado a partir do recurso conhecido como esfera de Bloch, que relacionam esses valores a funções trigonométricas, permitindo associá-los a ângulos φ e θ , conforme visualizado na Figura 1.

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle \quad (2)$$

Figura 1 – Esfera de Bloch.



Fonte: Nielsen e Chuang (2011).

Assim como na Computação Clássica, a CQ também possui um conjunto de portas lógicas capazes de realizar operações nesses qubits, conhecidas como portas quânticas. Essas portas podem ser operadas em circuitos quânticos, que, por sua vez, compõem os algoritmos quânticos (Montanaro, 2016). Com vista à propriedade de sobreposição de estados inerentes

⁶ Os operadores bra e ket seguem uma notação de Dirac, sendo caracterizados como vetores com uma representação matricial (Nielsen; Chuang, 2011).

aos qubits, esses algoritmos demonstram resultados teóricos e experimentais que denotam a sua aceleração com relação aos algoritmos clássicos. São exemplos mais conhecidos o algoritmo de fatoração de números inteiros (Shor, 1994), de busca em uma lista não estruturada (Grover, 1996) e de solução de sistemas de equações lineares (Harrow; Hassidim, 2008).

Com essas formulações, sempre foi de grande interesse para a comunidade científica a pesquisa na área da Informação Quântica e Computação Quântica, tendo em vista que é mais simples – e fidedigno – simular sistemas quânticos em computadores quânticos ao invés de computadores clássicos (Singh; Singh, 2016). No entanto, o atual investimento de empresas multimilionárias surgiu apenas após o impacto do trabalho de Shor, que propôs um algoritmo de fatoração de números inteiros com uma aceleração logarítmica, podendo quebrar criptografias RSA em instantes, o que jamais poderia ser feito de forma clássica (Ain; Rahman, 2016).

Atualmente, a IBM disponibiliza um pacote de desenvolvimento de softwares quânticos, conhecido como qiskit, além de uma plataforma IBM Quantum Experience que possibilita ao usuário acessar computadores quânticos reais de forma remota (IBMQ, 2022). A plataforma permite ao usuário desenvolver os circuitos por meio de uma interface ou por meio de códigos em python. Segundo Galvão *et. al* (2021), o python é uma linguagem que demonstra potencialidades para as aulas de Física frente a outras linguagens tendo em vista a sua robustez, sintaxe simples e um conjunto de bibliotecas com funções já conhecidas da Matemática e Física, o que pode indicar uma potencialidade de se trabalhar com programação quântica no EM.

Desse modo, muitas foram as formulações e descobertas para se chegar no atual patamar da CQ, passando desde o surgimento da MQ até a disponibilização de computadores quânticos de livre acesso remoto. Para facilitar a visualização desses ocorridos, foi montado um quadro com os principais resultados teóricos e experimentais associados à MQ e CQ, organizados cronologicamente (Ver Apêndice 1).

Com vista a essa popularização da CQ, alguns trabalhos, em sua maioria internacionais, têm sugerido a sua inserção no EM em tópicos associados à FMC (a exemplo de: Sawicki, 1999; Dur; Heusler, 2014; Cardoso; Ferrari, 2019; Almeida, 2021; Hughes *et al.*, 2022). Isso porque o crescimento significativo do interesse pela CQ, tanto da comunidade científica, quanto de empresas multimilionárias, tem demonstrado a importância de inserir discussões sobre esse tópico nas diversas esferas sociais. No contexto educacional, ela

demonstra potencialidades de ser trabalhada nos conteúdos FMC, de modo a viabilizar a formação de um cidadão que saiba se posicionar e interpretar o mundo a partir desse conhecimento.

No entanto, uma abordagem univocamente conceitual da CQ se mostra insuficiente para o alcance desses objetivos formativos, uma vez que limita o aprendizado dos estudantes em termos de desenvolvimento crítico e valorativo, aproximando-se do perfil de formação cidadã individualmente responsável (Kreuger; Ramos, 2017), tornando suficiente uma atualização curricular próxima dos objetivos da teoria tradicional (Silva, 1996). Para contemplar aspectos para além dos conceituais, faz-se necessária uma abordagem de aspectos que levem em consideração conteúdos que englobem todo o processo de ensino-aprendizagem, incluindo o desenvolvimento de habilidades e valores éticos. No campo da Pesquisa em EF, trabalhos apontam para a ACT como um caminho para a inserção da FMC no EM.

SEÇÃO 3: Alfabetização Científica e Tecnológica: um caminho para a inserção da Computação Quântica no Ensino Médio

Os desafios da contemporaneidade têm exigido de modo latente a necessidade de uma análise crítica dos problemas atuais, de modo a utilizar conhecimentos científicos e tecnológicos para propor soluções de forma socialmente responsável. Como exemplo, é possível destacar o recente período de pandemia acometida pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2), responsável pela doença Covid-19, em que foi necessária a mobilização de conhecimentos da C&T para o seu enfrentamento. Em virtude dessas problemáticas, diversos autores no âmbito do Ensino de Ciências têm defendido a importância de promover uma Alfabetização Científica e Tecnológica (ACT) que prepare os estudantes para exercer uma cidadania mais participativa (Silva; Sasseron, 2021).

Segundo a UNESCO (2017), a sua importância reside na capacidade de utilizar o conhecimento e os processos científicos e tecnológicos para compreender as questões e tomar decisões sobre o mundo natural e o mundo antropoceno. Isso porque ela envolve o desenvolvimento de habilidades como observação, investigação, análise crítica e interpretação de informações científicas e tecnológicas. Além disso, é importante que as pessoas sejam capazes de aplicar esses conhecimentos em situações cotidianas, como na resolução de problemas ambientais, no uso responsável de tecnologias e na tomada de decisões informadas (Valladares, 2021; Silva, Sasseron, 2021).

Em um trabalho de revisão bibliográfica, Sasseron e Carvalho (2011) apresentam algumas dessas discussões ao organizar os trabalhos da área a partir de eixos estruturantes associados à “compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais”; à “compreensão da natureza das ciências e dos fatores éticos e políticos que circundam sua prática”; e ao “entendimento das relações existentes entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente” (p. 75). Esses eixos denotam a pluralidade semântica da ACT, demonstrando que a sua abordagem nas aulas de Física não necessariamente implica no alcance de aspectos que dialoguem com uma formação genuinamente crítico-reflexiva.

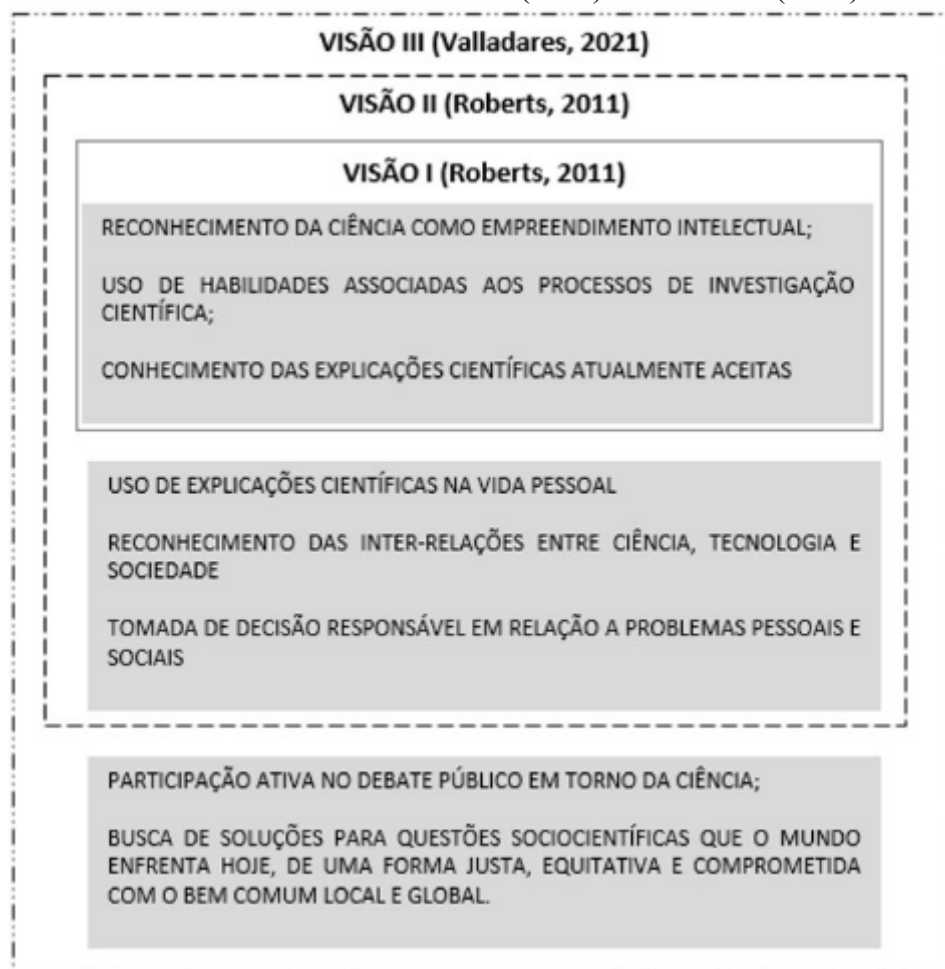
Para Auler e Delizoicov (2001), a ACT pode ser pensada a partir de duas perspectivas: a ACT reduzida e a ACT ampliada. A primeira “desconsidera a existência de construções subjacentes à produção do conhecimento científico-tecnológico” (Auler, Delizoicov, p. 122), fortalecendo mitos associados à C&T. Essa perspectiva se aproxima do eixo estruturante associado à compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais (Sasseron; Carvalho, 2011), mas se distancia dos demais de forma grosseira, uma vez que ignora o contexto social ao qual os estudantes fazem parte e isola as Ciências da Natureza das demais áreas do saber.

Já na perspectiva ampliada, há um diálogo direto entre C&T e o contexto social em que o indivíduo está inserido para o alcance de propósitos formativos mais amplos, desmistificando as concepções equivocadas sobre C&T (Auler; Delizoicov, 2001). Esse diálogo se mostra de suma importância para o desenvolvimento de um posicionamento crítico quanto a tópicos da Física, visto que há uma aproximação do estudante do contexto social ao qual está inserido, oportunizando o desenvolvimento de habilidades e atitudes frente às transformações da sociedade (Pinheiro; Silveira; Bazzo, 2007). Para tanto, os autores apontam como caminho possível à ACT ampliada o diálogo com temas associados à Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), tendo em vista a sua ênfase em questões sociais.

A abordagem de tópicos associados a essa tríade é de fundamental importância para evitar reducionismos no Ensino de Ciências, tais como: superioridade do modelo de decisões tecnocráticas, perspectiva salvacionista da Ciência-Tecnologia e o determinismo tecnológico (Auler; Delizoicov, 2001). Tais mitos não podem ser superados por meio de uma abordagem restrita de conceitos e pouco dialógica com outras áreas. Logo, abordagens de associação entre ACT ampliada implicam em uma formação para além da propedêutica e/ou mecanicista. Em outras palavras, a aproximação dessas abordagens no EF pode possibilitar uma formação crítico-reflexiva.

Em uma outra perspectiva, Silva e Sasseron (2021) discutem a ACT a partir de três categorias, denominadas de Visão I, Visão II e Visão III. Diferentemente da perspectiva de Auler e Delizoicov, em que a ACT reduzida e ampliada aparecem como opostas, as autoras interpretam as três visões como complementares. Na Figura 2, é possível visualizar essas relações, em que a Visão II utiliza dos conhecimentos e habilidades da Visão I, enquanto que a Visão III utiliza dos conhecimentos e habilidades da Visão I e II.

Figura 2 – Conhecimentos e habilidades necessários às diferentes visões de Alfabetização Científica baseada em Roberts (2011) e Valladares (2021).



Fonte: Silva & Sasseron (2021).

De modo geral, a Visão I e II são pensadas a partir da perspectiva de ACT discutida por Roberts (2001), em que buscava categorizá-la a partir de diferentes níveis. Desse modo, a Visão I tem como ênfase a aquisição de conhecimentos e habilidades científicas conceituais, refletindo a C&T em termos de produtos e processos internos, sendo, portanto conhecida como internalista. Nesse sentido, ela é vista como uma ferramenta que permite aos sujeitos compreender e aplicar conceitos científicos em situações cotidianas. Se comparada às

perspectivas apresentadas anteriormente, essa visão se aproxima do eixo estruturante referente à “compreensão básica de termos, conhecimentos e conceitos científicos fundamentais” discutido por Sasseron e Carvalho (2011) e à ACT reduzida discutida por Auler e Delizoicov (2001).

Na Visão II, a ideia convencional da ACT é ampliada ao incorporar uma compreensão crítica da C&T e a sua relação com a sociedade. Nela, a ênfase não está apenas no conhecimento científico, mas também na capacidade de avaliar criticamente as implicações sociais, políticas e éticas da C&T, bem como reconhecer como fatores externos podem afetar a investigação científica. Desse modo, ela é também denominada de externalista, compreendendo a C&T como um “empreendimento social e a importância do seu ensino para a tomada de decisões na vida cotidiana” (Silva, Sasseron, 2021). No entanto, ainda que seus objetivos se aproximem dos eixos estruturantes referentes à “compreensão da natureza das ciências e dos fatores éticos e políticos que circundam sua prática” e ao “entendimento das relações existentes entre ciência, tecnologia, sociedade e meio-ambiente” discutido por Sasseron e Carvalho (2011) e da ACT ampliada discutida por Auler e Delizoicov (2001), ela não é suficiente para alcançar a transformação social discutida nessas perspectivas.

Com vista a essa deficiência, a Visão III, discutida a partir do referencial de Valadares (2021), vai além das duas perspectivas anteriores, destacando a ACT como ferramenta de transformação social. De acordo com este ponto de vista, a C&T está para além de apenas uma coleção de fatos; é também uma ferramenta poderosa para abordar questões globais, a exemplo das alterações climáticas, a poluição e as desigualdades socioeconômicas. Logo, o objetivo central dessa Visão é encorajar os sujeitos a usarem a C&T como um meio de promover mudanças socialmente responsáveis, participando ativamente em discussões e ações relacionadas com a C&T, a fim de alcançar uma transformação social significativa. Essa Visão se aproxima fortemente da perspectiva de ACT ampliada proposta por Auler e Delizoicov, mas, nesse caso, é revisitada como complementar às anteriores.

Neste trabalho, a definição adotada à ACT se refere a um processo fundamental para a formação de indivíduos críticos e capazes de compreender e participar ativamente da sociedade contemporânea (UNESCO, 2017; Roberts, 2001; Sasseron; Carvalho, 2011). Para tanto, utiliza-se da perspectiva proposta por Silva e Sasseron (2021) para analisar a CQ no EM a partir das diferentes visões propostas pelas autoras. Nesse sentido, pode-se explorar seus aspectos conceituais a partir de problematizações a respeito do desenvolvimento

científico e tecnológico, seus altos custos, suas vantagens com relação ao desenvolvimento de tecnologias quânticas sustentáveis e a desmistificação de alguns dos mitos de C&T associados a ela (Lars, 2018).

Esses tópicos podem ser trabalhados a partir de diversos temas associados aos impactos da CQ no desenvolvimento social, tais como: quebra de criptografia e suas implicações significativas na segurança de dados e informações pessoais (Gisin *et al.*, 2002); modelagem de moléculas complexas, o que pode ajudar no desenvolvimento de novos medicamentos (CAO *et al.*, 2019); melhorias no desempenho da inteligência artificial, tornando-a mais rápida e eficiente (Lars, 2018); modelagem climática mais eficiente, podendo prever desastres naturais de maneira mais acelerada; melhorias na eficiência e no desempenho de sistemas de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas; otimização da produção agrícola e redução do desperdício de recursos naturais, como água e fertilizantes (Wolf, 2017; Lars, 2018; Rawat, 2022).

Portanto, defende-se neste trabalho que a inserção crítica da CQ no EM está para além de uma abordagem de conceitos, sendo necessário o trabalho com conteúdos que propiciem aos estudantes um aprendizado mais relevante e transformador da realidade ao qual estão inseridos. A abordagem com vista à ACT denota potencialidades no aprendizado de conceitos e na formação de atitudes e valores próximas do perfil de formação cidadã crítico-reflexivo. Com vista a essas colocações, cabe destacar que a proposta do trabalho é também o seu maior desafio, tendo em vista as limitações associadas à inserção crítica da QC no EM. Assim, o presente trabalho não busca respostas concretas ou algoritmos sobre essa inserção, mas sinalizar caminhos para que isso ocorra.

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA

Neste capítulo, serão apresentados os encaminhamentos metodológicos atrelados à pesquisa, discutindo aspectos sobre a sua natureza, seus objetivos, seus tipos, instrumentos a serem utilizados para coleta de dados e estratégias para análise dos dados. Com isso, busca-se estruturar as etapas da pesquisa e explicitar seu caráter científico, identificando-a a partir de métodos associados ao campo de pesquisa da área.

Desse modo, para contemplar os objetivos propostos para o trabalho, a presente pesquisa foi pensada a partir de duas etapas para a coleta de dados: (1) levantamento e análise de trabalhos acadêmicos sobre a inserção da CQ no EM e (2) discussão dos alcances formativos das práticas desenvolvidas na presente pesquisa a partir dessa análise inicial. Para tanto, a análise do trabalho será feita a partir de métodos qualitativos, buscando articular ambas as etapas.

Segundo Moreira (2003), enquanto as pesquisas quantitativas buscam a obtenção de determinados resultados com a generalização dos dados a partir de uma abordagem estatística inferencial⁷, em que o pesquisador se entende como alheio ao contexto social da pesquisa, as pesquisas qualitativas buscam uma abordagem mais detalhada do problema a partir de métodos de análise interpretativos que permitem chegar a conclusões mais precisas. Nesse último caso, o pesquisador entende a realidade como socialmente construída, considerando a sua subjetividade como inerente à interpretação dos resultados, ainda que haja objetividade na análise dos dados. No entanto, mesmo que ambas sejam de naturezas diferentes, cabe destacar que podem ser utilizadas em uma única pesquisa como complementares para o alcance de resultados mais concretos, sendo caracterizado como uma pesquisa mista, do tipo quali-quantitativa, ou ainda, quali-quanti (Pereira *et al.*, 2018).

Para além da natureza da pesquisa, cabe destacar a sua caracterização quanto aos objetivos propostos. Nesse ponto, as etapas apresentam objetivos semelhantes associados a uma pesquisa de caráter exploratório, que visam “proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses” (Gerhardt; Silveira, 2009). Para Gil (2007), esse tipo de pesquisa pode ser classificado como pesquisa bibliográfica, o que se mostra consoante com a primeira parte da presente pesquisa (1).

Entretanto, ainda que ambas as 1 e 2 estejam em concordância quanto aos objetivos da pesquisa, o tipo de pesquisa atrelado a elas apresenta características distintas. Isso porque enquanto a primeira etapa se adequa a uma pesquisa de cunho bibliográfico, a segunda

⁷ Área da Estatística que permite fazer inferências e generalizações sobre uma grande população a partir de uma amostra menor, utilizando técnicas de estimativa para determinar a precisão e validade das conclusões.

apresenta um caráter interventivo. Nesse sentido, para uma melhor organização dos encaminhamentos metodológicos referentes a elas, doravante serão explorados aspectos da primeira etapa para, em seguida, serem discutidos os aspectos associados à segunda etapa.

Na primeira etapa, conforme já mencionado, ela se caracteriza como do tipo bibliográfica, uma vez que é feita a partir da análise do levantamento de trabalhos publicados periódicos e anais de eventos. Esse tipo de pesquisa é definida por propor a análise das diversas posições acerca de um problema (Gil, 2007). Em um recorte ainda mais específico, a presente pesquisa pode ser classificada a partir de uma pesquisa bibliográfica empírica, visto que esse tipo de pesquisa visa explicar como “o problema em questão vem sendo pesquisado, especialmente do ponto de vista metodológico” (Luna, 1997, p. 21). Esse tipo de revisão bibliográfica busca responder questões específicas do trabalho, estando nesse caso associado à própria questão foco da pesquisa. Porquanto, o levantamento foi organizado a partir de um quadro contendo a identificação do trabalho, seu título, autores, local de publicação, evento ou periódico e ano de publicação, conforme explicitado abaixo.

Para organização dos artigos presentes no quadro, foi considerado como banco de dados os trabalhos presentes no Scholar (Google Acadêmico) a partir de uma busca dos resultados considerando as seguintes palavras-chave: Computação Quântica ou *Quantum Computing*; ensino médio ou *high school*; Informação Quântica ou *Quantum Information*; Tecnologias Quânticas ou *quantum technologies*; educação em Física ou *Physics education*. A utilização de termos em inglês é justificada tendo em vista a ausência de trabalhos no contexto brasileiro – somente dois, ambos de mesma autoria e sobre a mesma prática –, além da fluência do autor na língua inglesa. No processo de levantamento, obteve-se um número considerável de trabalhos sobre o ensino da CQ na graduação, que foram devidamente descartados da análise devido ao objetivo da pesquisa ser associado ao EM.

Complementar a isso, cabe destacar que, em todos os casos, foi feita uma busca nos periódicos e eventos publicados até novembro de 2022 que aparecem no Quadro 2, tendo somente um único trabalho publicado em todos os casos, com exceção da *International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, com dois trabalhos. Devido às limitações associadas ao pouco número de trabalhos sobre o tema da pesquisa, não foi realizada uma delimitação do *corpus* de análise antes do levantamento de trabalhos, sendo considerado apenas o próprio banco de dados. No entanto, cabe destacar que, após essa busca, foram considerados periódicos e eventos nacionais e internacionais de grande renome para o levantamento, com nenhum trabalho abordando a inserção da CQ no EM presente em seu

acervo, a saber: Revista Brasileira de Ensino de Física, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ensaio, American Journal of Physics, European Journal of Physics, Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF) e Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF).

No que tange à escolha pelo banco de dados, destaca-se que o Google Acadêmico tem se tornado uma ferramenta amplamente utilizada por pesquisadores de diversas áreas, tendo em vista o grande número de trabalhos presentes em seu acervo (Mugnaini; Strehl, 2008). Segundo a empresa, os trabalhos aparecem de acordo com sua relevância, considerando “o texto integral de cada artigo, o autor, a publicação em que o artigo saiu e a frequência com que foi citado em outras publicações acadêmicas” (Google Acadêmico, 2007). Complementar a isso, a plataforma tem a autorização de praticamente todas as editoras para a divulgação dos trabalhos em rede, uma vez que esses eles ganham uma maior popularização a partir do Google Acadêmico (Mugnaini; Strehl, 2008).

Finalizado o levantamento dos trabalhos que abordam a inserção da CQ no EM, a sua análise será realizada a partir da Análise Textual Discursiva (ATD), tendo em vista os seus alcances com relação à construção de novos significados. A ATD é uma abordagem de pesquisa qualitativa que busca compreender o sentido dos textos, considerando seu contexto e a interação entre os sujeitos envolvidos. Assim, sua fundamentação se baseia em uma perspectiva construcionista, que entende a produção de sentido como um processo social e histórico, influenciado pelas experiências, valores e crenças dos indivíduos (Moraes; Galiazzi, 2011). Para realizar a análise, utiliza-se de técnicas de leitura atenta, codificação e categorização dos dados, buscando identificar padrões e relações entre os elementos presentes no texto.

Segundo Moraes (2003), a ATD pode ser pensada a partir de quatro focos: desmontagem dos textos ou processo de unitarização, estabelecimento de relações, captando o novo emergente, e processo auto-organizado. No primeiro foco, a ênfase é dada na leitura e análise detalhada dos trabalhos, enquanto que no segundo foco busca-se estabelecer relações entre os elementos e características desses trabalhos para a categorização. No terceiro foco, a ênfase é dada à emergência de novos significados e interpretações a partir dos dois primeiros focos anteriores, possibilitando se pensar em novos horizontes a partir da análise. Por fim, o quarto foco denota o caráter para novas compreensões e, portanto, a imprevisibilidade dos novos resultados, ainda que o processo siga um processo racionalizado e planejado de coleta e análise dos dados.

Na presente pesquisa, além de descrever e interpretar esses dados de forma objetiva, busca-se compreender os discursos por trás de determinados aspectos do trabalho, como dimensões de ACT, o não alcance de uma aprendizagem participativa, a ausência de determinados conteúdos nessas práticas em detrimento de outros etc. Logo, a ATD demonstra potencialidades para se alcançar esses objetivos. Feita a descrição da primeira etapa, segue abaixo o quadro com o levantamento dos trabalhos (Quadro 1).

Quadro 1 – Levantamento de trabalhos sobre CQ no EM

Identi- ficação	Título	Autores/as	Local	Evento/ Periódico	Ano
T1	Quantum Computing for High-School Students an Experience Report	Prashanti Priya Angara; Ulrike Stege; Andrew MacLean	Nottingham, Inglaterra	2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)	2020
T2	Teaching Quantum Computing to High-School-Aged Youth: A Hands-On Approach	Prashanti Priya Angara; Ulrike Stege; Andrew Maclean; Hausi A. Müller; Tom Markham	Estados Unidos da América	IEEE Transactions on Quantum Engineering	2021
T3	Quantum Computing for high school: an approach to interdisciplinary in STEM for teaching	Sara Satanassi; Paola Fantini; Roberta Spada; Olivia Levrini1	Atlanta, Estados Unidos da América	Journal of Physics: Conference Series	2021
T4	Piloting a full-year, optics-based high school course on quantum computing	Joel A Walsh; Mic Fenech; Derrick L Tucker; Catherine Riegle-Crumb; Brian La Cour	Estados Unidos da América	Physics Education	2021
T5	Teaching High School Quantum Computing	Junbin Sun	Nova York, Estados Unidos da	Proceedings of Student-Faculty Research	2019

	Scenarios		América	Day, CSIS	
T6	Designing and implementing materials on quantum computing for secondary school students: The case of teleportation	Sara Satanassi; Elisa Ercolessi; Olivia Levrini	Nova York, Estados Unidos da América	Physical Review Physics Education Research	2022
T7	Quantum Computing As a Topic in Computer Science Education	Stefan Seegerer; Tilman Michaeli; Ralf Romeike	Nova York, Estados Unidos da América	16th Workshop in Primary and Secondary Computing Education	2021
T8	A Computer Science-Oriented Approach to Introduce Quantum Computing to a New Audience	Özlem Salehi; Zeki Seskir; Ilknur Tepe	Liverpool, Inglaterra	IEEE Transactions On Education	2022
T9	Entanglion: A Board Game for Teaching the Principles of Quantum Computing	Justin D. Weisz; Maryam Ashoori; Zahra Ashktorab	Austrália	CHI PLAY	2018
T10	Introducing Quantum Key Distribution to High School Students	Zeynep Gonca Akdemir; Muhsin Menekse; Mahdi Hosseini; Arindam Nandi; Keiichiro Furuya	Virginia, Estados Unidos da América	The Science Teacher	2021
T11	A Survey of Educational Efforts to Accelerate a	Thomas Plunkett; Terrill Frantz; Hamida Khatri; Praveen	Nottingham, Inglaterra	2020 IEEE International Conference on Quantum	2020

	Growing Quantum Workforce	Rajendran; Sunny Midha		Computing and Engineering (QCE)	
T12	Hardware and software tools for teaching the basics of quantum informatics to students of specialized (high) schools	Liudmyla V. Lehka; Svitlana V. Shokaliuk; Viacheslav V. Osadchyi	Kyiv, Ukraine	9th Workshop on Cloud Technologies in Education	2021
T13	Educação problematizadora no ensino de Computação Quântica: um caminho para a Alfabetização Científica e Tecnológica	Andiara Pereira dos Santos Cardoso; Paulo Celso Ferrari; Norton Gomes de Almeida	Natal, RN	XII ENPEC	2019
T14	Potencialidades Da Computação Quântica Problematizada para Discutir Ciência, Tecnologia e Sociedade	Andiara Pereira dos Santos Cardoso; Paulo Celso Ferrari; Norton Gomes de Almeida	Mato Grosso	Experiência em Ensino de Ciências (EENCI)	2019

Já na segunda etapa do trabalho, conforme mencionado anteriormente, seu caráter é de intervenção, pois a pesquisa se trata de uma investigação social realizada a partir de atividades de aplicação planejada. Em um recorte específico, essa atividade pode ainda ser caracterizada como do tipo pesquisa de aplicação, que faz parte da pesquisa interventiva. Segundo Teixeira e Neto (2017), essas pesquisas são “investigações baseadas em projetos nas quais as prioridades de investigação são definidas integralmente pelos pesquisadores” (p. 1069), ou seja, toda a intervenção segue objetivos e estruturação inteiramente delimitados pelos pesquisadores durante o seu planejamento para aplicação posterior. Logo, uma pesquisa

aplicada não necessariamente precisa se comprometer em gerar ressignificações como na pesquisa-ação ou integrar-se a uma comunidade, como na pesquisa etnográfica, sendo suficiente a busca de caminhos para abordar a problemática proposta. No caso da presente pesquisa, a problemática estaria associada justamente à questão-foco.

As delimitações da pesquisa são pensadas a partir do contexto em que ela será realizada, a saber: oficinas realizadas em escolas do EM da cidade de Barreiras-BA, caracterizadas como ações pontuais (A1), e estudantes do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) Júnior, caracterizadas como ação de longa duração (A2). Como instrumentos de coleta de dados para as ações, destacam-se os registros das práticas expositivas dialogadas e das atividades desenvolvidas pelos estudantes. Esses registros⁸ serão feitos após cada encontro, tendo ênfase para a descrição da dinâmica dos encontros, dúvidas dos estudantes e momentos de imprevisibilidade. As descrições do projeto podem ser visualizadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Descrição das Etapas das ações do tipo A2

Etapas	Semanas	Descrição
1	6	Importância da CQ para futura revolução tecnológica explicitando seus impactos na sociedade. Apresentação das ferramentas computacionais necessárias para o desenvolvimento do projeto: 1) qiskit da <i>IBM Quantum Experience</i> ; e 2) linguagem de programação python e suas bibliotecas numpy e matplotlib.
2		Introdução às bases teóricas da CQ: 1) Álgebra Linear; 2) Teoria da Probabilidade; 3) Primórdios da Mecânica Quântica; 4) Postulados da Mecânica Quântica; 5) Teoria da Computação. Justificativas e implicações da CQ no atual contexto social e de desenvolvimento científico e tecnológico.
3		Tópicos gerais de Computação Quântica: 1) Qubit; 2) Portas lógicas quânticas; 3) Circuitos quânticos; e 4) Operações básicas. Aplicações da Computação Quântica em áreas do conhecimento e seus impactos na humanidade.
4		Tópicos específicos de Computação Quântica: nesta etapa, os estudantes irão focar no estudo de algoritmos quânticos designados para eles, pesquisando seu funcionamento e aplicações, sejam científicas, sejam industriais.
5	8	Desenvolvimento dos próprios algoritmos quânticos baseados no estudo da Etapa 4.

⁸ Esses registros são utilizados para a descrição das ações, feita na seção 1 dos resultados.

Considerando as etapas delineadas no presente capítulo, busca-se chegar a asserções de conhecimentos e de valores que possibilitem (re)pensar a inserção da CQ no EM sob a ótica de diferentes objetivos formativos. Para tanto, o trabalho propõe a organização de diferentes enfoques relacionados a dimensões de formação crítica dos estudantes, assim como uma matriz orientadora capaz de relacionar esses enfoques com diferentes objetivos de aprendizagem. Tendo em vista que os resultados demarcam a construção dos enfoques e da matriz orientadora, as suas especificidades são discutidas na próxima seção.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta o auge das investigações delineadas no capítulo anterior com relação às práticas de ensino de CQ no âmbito do EM identificadas no *corpus* de análise do presente trabalho. Nesse sentido, os resultados do estudo serão apresentados no tocante às contribuições para as discussões no campo em ascensão, enfatizando as potencialidades e limitações identificadas durante a pesquisa.

Em primeiro plano, serão descritas as práticas do *corpus* de análise da pesquisa, seja em termos das ações de ensino identificadas no levantamento (Quadro 1), seja em termos das ações de ensino realizadas no âmbito da pesquisa (A1 e A2). Em segundo plano, como resultado da análise dessas ações, será apresentada uma categorização das práticas de ensino de CQ no EM considerando três enfoques: Conceitual, Instrumental e Sociocientífico. Para o Enfoque Conceitual, a ênfase é dada nos conteúdos da CQ e de suas bases teóricas. Para o Enfoque Instrumental, a ênfase é dada nas ferramentas computacionais utilizadas nas práticas. Para o Enfoque Sociocientífico, destaca-se a formação de valores e atitudes nos estudantes para uma participação social mais significativa.

Como desdobramento conclusivo desta pesquisa, mediante a metodologia de Análise Textual Discursiva adotada, emergem, a partir de distintos enfoques, novos significados no que tange às práticas de ensino em termos de objetivos de aprendizagem para os estudantes. Tais significados são sistematizados em uma matriz orientadora que estabelece relações entre os objetivos de aprendizagem e os diversos enfoques analisados. Doravante, serão apresentadas as seções referentes a esses resultados seguindo a sequência descrita.

Seção 1: Descrição do *corpus* de análise

Esta seção tem por objetivo apresentar uma descrição dos trabalhos que compõem o *corpus* de análise, buscando situar o leitor no contexto das práticas de ensino de CQ destinadas a estudantes do EM. Inicialmente, serão delineados os trabalhos da fase de revisão bibliográfica, conforme apresentado no Quadro 1. Posteriormente, serão elucidados elementos referentes às atividades conduzidas junto a estudantes de instituições de ensino na cidade de Barreiras, denominadas respectivamente de A1 e A2.

No trabalho 1 (T1), é apresentada uma abordagem para ensinar CQ a estudantes do EM por meio de ações pontuais (Angara; Stege; Maclean, 2020). Os autores compartilham suas experiências na organização e realização de *workshops* de dois dias, em que introduzem conceitos básicos do campo de maneira interativa. Os *workshops* usam uma variedade de

atividades, incluindo jogos, quebra-cabeças e simulações para auxiliar na compreensão de princípios fundamentais da MQ, CC e CQ, bem como a sua aplicação em problemas do mundo real. Assim, são discutidos os desafios de ensinar CQ a estudantes com pouca ou nenhuma experiência no campo, de modo a propor estratégias para superar esses desafios.

Em sua organização, o artigo apresenta uma revisão da literatura sobre ensino de CQ, incluindo recursos como livros-texto e tutoriais do *Qiskit* com os códigos de programação. Os autores descrevem então o design de seus *workshops*, que incluem atividades para um potencial novo capítulo do *Computer Science Unplugged*⁹. A ação, com duração de oito horas, introduz conceitos básicos da área, como qubits, portas lógicas e emaranhamento. Como reflexões finais, são discutidas as lições aprendidas nas experiências e uma perspectiva para o futuro da educação em CQ.

No Trabalho 2 (T2), de mesma autoria, é apresentada uma abordagem complementar ao T1, adicionando uma segunda etapa ao *workshop* para discutir elementos com ênfase na matematização da CQ. O objetivo da prática é introduzir os estudantes nessa área e mostrar como ela pode revolucionar diversos ramos da indústria. Para tanto, são apresentados seus conceitos com uma abordagem algébrica e estatística. O objetivo final é fornecer aos estudantes uma compreensão sólida da CQ e suas aplicações, preparando-os para futuras carreiras em áreas relacionadas.

No Trabalho 3 (T3), os autores descrevem as ações objetivando nortear as futuras práticas de professores que pretendem introduzir a CQ em suas aulas do EM (Satanassi *et al.*, 2021). O trabalho apresenta uma abordagem que combina conceitos de MQ, Matemática e CC para ensinar os fundamentos do campo, assim como uma breve contextualização histórica dessas áreas. Em seguida, é apresentada uma abordagem em três níveis para o ensino de CQ: uma introdução aos conceitos básicos, seguida por uma discussão mais completa da MQ e, finalmente, uma exploração de suas aplicações práticas.

Em resumo, o trabalho reconhece a CQ como um tópico complexo e desafiador, mas argumenta que é importante para os estudantes entenderem os seus fundamentos, devido ao seu potencial de revolucionar muitos campos, incluindo criptografia, inteligência artificial e medicina. Outrossim, os autores também destacam a importância de atividades práticas e projetos para auxiliar os estudantes a aplicar seus conhecimentos em situações do mundo real e desenvolver habilidades importantes, como resolução de problemas e pensamento crítico.

⁹ Site de Educação em Ciência da Computação. Disponível em < <https://www.csunplugged.org/en/> >.

No âmbito do trabalho 4 (T4), descreve-se o desenvolvimento e implementação de um curso de CQ direcionado ao EM, no qual a óptica clássica serve como fundamento para a introdução de conceitos da MQ por meio de experimentos com polarização da luz (Walsh *et al.*, 2021). O curso foi concebido com o propósito de instruir os estudantes nos princípios fundamentais da área antes de adentrar formalismos matemáticos mais intrincados. Na metodologia empregada, os estudantes conduziram experimentos reais e virtuais utilizando simuladores de óptica quântica e computadores quânticos. Assim, os resultados evidenciaram que a adoção da óptica clássica proporcionou uma abordagem acessível para representar estados quânticos e portas lógicas quânticas, facilitando, assim, o processo de aprendizagem e assimilação de conhecimento.

No trabalho 5 (T5), o autor realiza uma análise em formato de proposta acerca da implementação da CQ para estudantes do EM (Sun, 2020). Em resumo, o projeto defende a necessidade de uma abordagem mais técnica no processo de ensino, sugerindo a aplicação da álgebra linear para ensinar conceitos fundamentais como qubits, portas lógicas quânticas e circuitos quânticos. Além disso, é recomendável incorporar essas intervenções a atividades extracurriculares.

No sexto trabalho (T6), também de autoria do mesmo pesquisador, são delineados três níveis de ensino de Computação Quântica (CQ) no Ensino Médio: o nível lógico, o nível técnico-experimental e o nível narrativo (Sun, 2019). A lógica fundamental da CQ é apresentada no primeiro estágio. Os experimentos e métodos utilizados na disciplina são apresentados no segundo estágio. O nível narrativo, por outro lado, examina as consequências culturais e sociais da CQ, incluindo seu impacto no mercado econômico, criptografia e outros domínios. Como conclusão, o autor afirma que o interesse e envolvimento dos estudantes com os materiais educacionais relacionados à área pode indicar um resultado positivo para a abordagem.

No trabalho 7 (T7), é realizada uma análise didática inicial do assunto, de natureza teórica e propositiva, identificando termos e conceitos centrais, bem como questões relevantes com base na literatura existente (Seegerer; Michaeli; Romeike, 2021). Os autores conduziram uma entrevista em grupo com especialistas para determinar os candidatos para as ideias centrais da CQ, relacionando-as com trabalhos publicados sobre práticas de ensino do campo para diferentes níveis. Como conclusões, os autores argumentam que essas ideias tornam a educação em CQ mais acessível e estruturam o campo com foco em princípios fundamentais pertinentes a longo prazo.

O trabalho 8 (T8), de natureza teórica e propositiva, apresenta seções que abrangem desde os conceitos básicos de sistemas clássicos e probabilísticos até a implementação de algoritmos quânticos avançados, como o algoritmo de busca de Grover (Salehi; Seskir; Tepe, 2022). Cada seção contém uma série de tarefas práticas que os participantes devem realizar usando a biblioteca *qiskit*, permitindo que eles experimentem e visualizem os conceitos teóricos na prática. Outrossim, o trabalho também inclui uma pesquisa para avaliar a eficácia da abordagem de ensino proposta, tendo 22 *workshops* como *corpus* de análise. Os resultados da pesquisa mostraram que a abordagem de ensino baseada em programação quântica foi eficaz na melhoria do conhecimento dos participantes sobre CQ. Além disso, a abordagem foi bem recebida pelos participantes, que relataram que a programação quântica tornou o aprendizado mais interessante e envolvente.

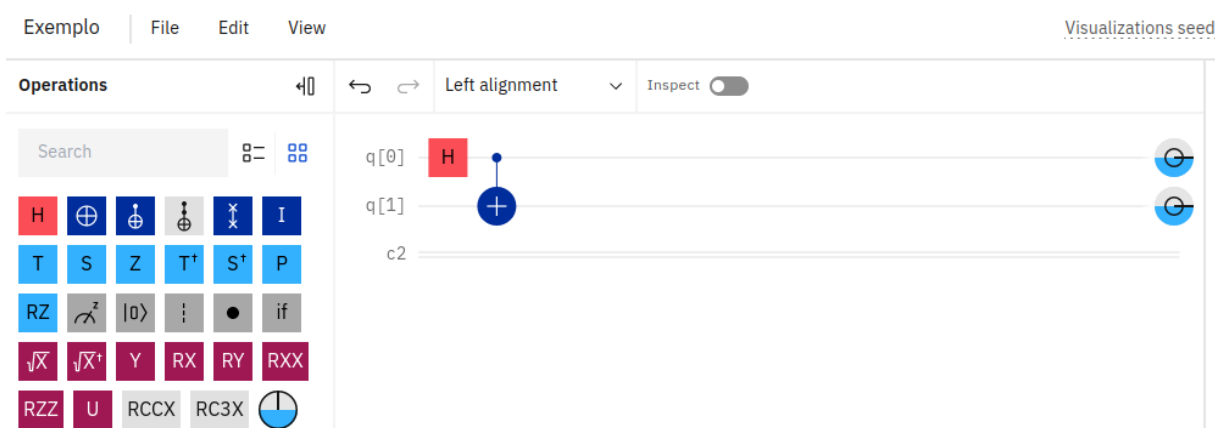
No trabalho 9 (T9), a abordagem da prática de ensino se baseia no *Entanglion*, um jogo de tabuleiro desenvolvido por pesquisadores da IBM com o objetivo de ensinar os princípios da CQ (Weisz; Ashoori; Ashktorab, 2018). Durante os testes, o jogo recebeu *feedback* positivo de estudantes e profissionais, sendo considerado uma forma interativa e educativa de introduzir conceitos complexos aos jogadores de todas as idades. O estudo utilizou uma abordagem mista, coletando dados quantitativos e qualitativos para avaliar a experiência dos jogadores. Os profissionais da indústria avaliaram o jogo com base em suas impressões qualitativas gerais e o consideraram valioso como ferramenta educacional. Já os estudantes responderam a um questionário que avaliou sua experiência de jogo com base em sete dimensões, como desafio, competência e imersão sensorial e imaginativa.

No trabalho 10 (T10), é abordada a utilização da distribuição quântica de chaves (QKD) como uma aplicação prática da tecnologia quântica. Os autores discutem os desafios de ensinar conceitos de criptografia quântica para estudantes do EM e apresenta um plano de aula e uma atividade prática para auxiliar nesse processo (Muhsin, 2020). O planejamento da ação inclui discussões sobre conceitos fundamentais da MQ, como dualidade onda-partícula, superposição quântica, entrelaçamento quântico e criptografia quântica. Outrossim, a atividade prática com o *kit* de demonstração de criptografia quântica permite que os estudantes experimentem na prática os princípios da QKD, ajudando-os a compreender melhor essa tecnologia e seus benefícios em termos de segurança da informação. Complementar a isso, estratégias de diferenciação também são apresentadas para atender às necessidades de estudantes com planos de educação individualizados.

No trabalho 11 (T11), de natureza teórica e propositiva, a ênfase é dada aos esforços educacionais para acelerar a formação de profissionais na área da CQ (Plunkett *et al.*, 2020). O estudo identifica abordagens atuais para educar estudantes de diferentes grupos de aprendizado, incluindo profissionais que desejam aprimorar suas habilidades, estudantes do EM que estão explorando seus interesses e indivíduos que buscam um mestrado formal na área. Além disso, são discutidos os desafios enfrentados na formação de uma força de trabalho qualificada em CQ e são apresentados programas e iniciativas específicas para o desenvolvimento de habilidades em computação quântica.

O trabalho 12 (T12), de natureza teórica e propositiva, aborda a seleção de plataformas de *hardware e software* para o ensino de CQ em escolas especializadas (Lehka *et al.*, 2021). São apresentados critérios para a escolha de uma plataforma baseada em nuvem, como interface intuitiva, acesso gratuito, suporte ao desenvolvimento do ambiente e suporte para algoritmos quânticos em modo gráfico. São analisadas as opções da Microsoft, QuTech, Amazon Braket e IBM, sendo esta última escolhida como a plataforma mais adequada. O artigo descreve o trabalho no IBM Quantum Composer (Figura 3) e IBM Quantum Lab¹⁰, fornecendo informações sobre operações e portas quânticas. Também é apresentado um exemplo de implementação de teletransporte quântico.

Figura 3 – Interface do IBM Quantum Composer. Para a construção do circuito, basta mover as portas lógicas quânticas (localizadas à esquerda) para os qubits no circuito (à direita).



Nos trabalhos 13 (T13) e 14 (T14), ambos sob a mesma autoria e centrados em uma prática comum, é apresentada uma pesquisa preliminar que investiga as potencialidades da Computação Quântica (CQ) no ensino médio, visando abordar as interações entre ciência, tecnologia e sociedade (Cardoso *et al.*, 2019). Adotando uma sequência didática

¹⁰ Enquanto o IBM Quantum Composer permite a construção de circuitos quânticos de maneira ilustrativa, o IBM Quantum Lab permite essa construção utilizando a linguagem de programação *python*.

fundamentada na filosofia educacional de Paulo Freire, os pesquisadores problematizam o conceito de computador quântico em uma turma de primeiro ano do ensino médio em uma instituição pública. Os dados obtidos revelaram que a abordagem problematizadora do computador quântico não apenas contribui para a compreensão de conceitos técnicos e científicos, mas também oferece oportunidades para atenuar perspectivas excessivamente otimistas sobre inovações tecnocientíficas, incentivando discussões que transcendem os impactos puramente pós-produção.

No caso das ações do tipo A1, efetivada no âmbito da pesquisa, foram realizadas 5 oficinas com duração variando de 1 hora a 4 horas, de acordo com as seguintes estratégias metodológicas: aulas expositivas-dialogadas com conceitos fundamentais da MQ e CC; introdução aos conceitos iniciais da CQ por meio de analogias lúdicas, e; utilização do *IBM Quantum Composer* para trabalhar os conceitos de qubits, portas lógicas e circuitos quânticos de maneira qualitativa. O aprofundamento em cada estratégia metodológica está intrinsecamente associado à duração de cada oficina, ou seja, em oficinas de uma hora a quatro horas, os conceitos são explorados de maneira breve, enquanto que as disciplinas de 4 horas tiveram o maior potencial de explorar os conceitos, de forma teórica e prática, e a relevância da CQ para problemas do mundo real.

No caso das ações do tipo A2, o projeto de PIBIC Júnior, composto por cinco (5) estudantes, é organizado em cinco etapas sequenciais (Quadro 2). A Etapa 1 concentrou-se nas implicações sociais da CQ em termos de quebra de paradigma com a Computação Clássica para a iminente revolução tecnológica, visando estimular o interesse contínuo dos participantes nas ações subsequentes. Paralelamente, são apresentadas as ferramentas computacionais essenciais para o desenvolvimento do projeto, tais como o *IBM Quantum Composer* para a elaboração de circuitos quânticos, a linguagem de programação *Python* e o *Qiskit* da *IBM Quantum Experience*. Nesse sentido, desafios foram propostos, permitindo que os estudantes adquirissem proficiência no uso dessas ferramentas ao longo das fases subsequentes.

Na Etapa 2, a pesquisa se concentrou nas bases teóricas da CQ. Isso incluiu o estudo de Álgebra Linear, Teoria da Probabilidade, Primórdios da Mecânica Quântica, Postulados da Mecânica Quântica e Ciência da Computação. Para essa etapa, considerando maior tempo destinado a ela, foi possível explorar esses conceitos com maior ênfase na matematização. Essa etapa também aborda a justificativa da CQ e suas implicações no desenvolvimento

tecnológico, científico e socioeconômico atual a partir de uma abordagem histórica da MQ, CC e CQ, de modo a traçar cenários futuros (ver apêndice 1).

Em se tratando de tópicos gerais de CQ, como qubits, portas lógicas quânticas, circuitos quânticos e operações básicas, sua abordagem teve como ênfase a Etapa 3, em que foram introduzidas essas noções gerais por meio de códigos. Como um passo a mais nessas práticas, a Etapa 4 concentrou-se na aplicação desses termos gerais para algoritmos quânticos específicos, como o algoritmo de teleporte ou algoritmo de busca de Grover. Feitas essas explicações mais técnicas, os estudantes recebem como atividades de pesquisa buscar aplicações futuras dos algoritmos estudados no mundo real.

Na Etapa 5, os estudantes tiveram como atividade final o desenvolvimento de algoritmos quânticos próprios, baseado em trabalhos da área. Essa progressão estruturada tem como objetivo fornecer aos estudantes do EM uma compreensão abrangente e prática da CQ. O fato de terem conseguido construir seus próprios algoritmos, ao invés de apenas reproduzi-los, demonstra um *feedback* positivo com relação a assimilação dos conteúdos da área. E ainda, outro fator importante foi o aceite dos trabalhos desenvolvidos pelos estudantes no XXXVII Encontro de Física do Norte e Nordeste, caracterizado como um dos maiores eventos regionais de Física no país. Desse modo, os estudantes conseguiram, de fato, se engajar em atividades de produção do conhecimento científico e de difusão desses conhecimentos.

Em linhas gerais, os trabalhos fornecem contribuições para a reflexão na área, buscando aprimorar as práticas de ensino em CQ no EM. Contudo, é pertinente ressaltar que a discussão apresentada nesta seção é de natureza predominantemente descritiva, uma vez que não se engaja em uma análise crítico-reflexiva das práticas. Essa análise mais aprofundada será empreendida nas seções subsequentes, utilizando o *corpus* de análise delineado nesta seção como base para a categorização das práticas em distintos enfoques.

Seção 2: Enfoque Conceitual

A Computação Quântica emerge como uma interface entre duas disciplinas fundamentais: a Mecânica Quântica e a Ciência da Computação. Seu desenvolvimento encontra-se intrinsecamente ligado aos princípios fundamentais do comportamento de sistemas quânticos de dois níveis, conhecidos como qubits, e à evolução da computação desde a proposição da Máquina de Turing, em 1936. Diante desse contexto, uma abordagem

conceitual apropriada se destaca pela integração de conceitos provenientes de ambas as áreas, visando uma introdução gradual e abrangente dos conteúdos da CQ.

Segundo Nielsen e Chuang (2010), enquanto a MQ viabiliza a descrição de circuitos quânticos, a CC é a chave para compreensão da construção e análise dos algoritmos. Logo, abordagens que negligenciam a MQ, ainda que possam implicar na reprodução de algoritmos quânticos, são insuficientes para permitir uma interpretação teórica desses resultados; abordagens que negligenciam a CC, ainda que permitam uma interpretação dos circuitos quânticos, são insuficientes para compreensão de elementos procedimentais do campo. Nesses casos, a CQ é apresentada de modo incompleto, reduzindo-se ou a uma evolução da CC, ou a uma aplicação da MQ. Esse tipo de abordagem é definida no presente trabalho como proveniente de um **Enfoque Conceitual “Simplório” (EC1)**, ou ainda, Enfoque Conceitual de Etapa 1.

No levantamento de trabalhos realizado na primeira parte da pesquisa (Quadro 1), os trabalhos T5 e T8 são caracterizados pelo EC1, uma vez que enfatizam aspectos procedimentais da área atrelados à utilização de tecnologias para a reprodução de algoritmos quânticos, negligenciando elementos da MQ. No caso do T5, é discutida uma proposta sobre a implementação de CQ para estudantes do EM a partir da defesa de uma abordagem mais técnica para os estudantes de conceitos da CC (Sun, 2020). Já no T8, a proposta é de ensino de CQ com ênfase em questões matemáticas com forte apelo à CC e Estatística (Salehi; Seskir; Tepe, 2022). Em ambos os casos, os trabalhos apresentam uma fragilidade em termos de introdução da FMC no EM, uma vez que não há ênfase nos conceitos da Física Quântica.

Além disso, foram também caracterizados como de EC1 os trabalhos T13 e T14. Diferentemente do T5 e T8, a ênfase dos autores foi no ensino de conceitos da MQ a partir de aplicações na CQ, tais como as noções de sobreposição e emaranhamento – aspecto pouco explorado nas práticas de ensino. No entanto, esse aprofundamento conceitual foi substituído pelo aprofundamento conceitual em CC, levando a uma articulação simplória dessas áreas. Nesse caso, ainda que o trabalho tenha como ponto forte a inserção da FMC no EM, a sua abordagem se reduziu a uma simples exemplificação da CQ ao invés de abordagem genuína de seus conceitos.

Com vista à análise desses trabalhos, faz-se necessário destacar um aspecto importante do EC1: a sua abordagem não necessariamente implica em explorar de modo superficial os conteúdos da CC ou MQ, mas em uma desarticulação dessas áreas, o que limita uma introdução adequada à CQ. Conforme discutido, os trabalhos T5 e T8 introduzem uma

abordagem capaz de proporcionar aos estudantes a reprodução de algoritmos quânticos, mas insuficientes para uma interpretação genuína de seus resultados. Já os trabalhos T13 e T14, ainda que possam gerar interpretações consistentes, não avançam em termos de aplicações práticas. Nesses últimos trabalhos, os autores destacam a falta de tempo como justificativa para a falta de aprofundamento.

Entretanto, considerando a definição de EC1 do presente trabalho, cabe destacar que a escassez de tempo para a realização das práticas de ensino não necessariamente implica nesse enfoque, uma vez que é possível introduzir conceitos basilares da CQ de forma balanceada mesmo em ações pontuais. Como exemplo, é possível citar os trabalhos T1 e T9 (Quadro 1), em que a abordagem da CC e MQ não envolve elementos complexos da Álgebra Booleana, Álgebra Linear ou Estatística, mas conseguem introduzir os conceitos-chave das áreas de modo gradual em ações de curta duração. Práticas de ensino com essa abordagem são definidas no presente trabalho como ações de **Enfoque Conceitual Qualitativo, ou Enfoque Conceitual de Etapa 2 (EC2)**. Contudo, é crucial ressaltar que, apesar da terminologia utilizada, as práticas associadas a essa abordagem não resultam na exclusão integral de elementos matemáticos, mas sim na sua utilização limitada.

Nos trabalhos supracitados, T1 e T9, os autores exploram esses aspectos em ações pontuais. No caso do T1, são abordados conceitos básicos da computação quântica, como qubit, emaranhamento, portas lógicas e circuitos quânticos. Os autores abordam esses conceitos usando exemplos lúdicos, como jogos e experimentos mentais¹¹. De um modo geral, os resultados obtidos nessa etapa são descritos como satisfatórios dada a avaliação da aprendizagem realizada pelos autores. Para o T9, os autores abordam a utilização de um jogo, *Entangleon*, para o ensino de computação quântica. No jogo, os jogadores devem viajar por planetas em diferentes galáxias para recolher recursos para a construção de um computador quântico. Assim, ambos utilizam de exemplos lúdicos para introduzir conceitos da CQ, sem a necessidade de domínio de programação. No entanto, isso não significa que os estudantes não possam desenvolver seus algoritmos, uma vez que no T1 os autores utilizaram o *IBM Quantum Composer*¹², caracterizado como uma plataforma que permite a criação de circuitos quânticos apenas movendo ícones (Figura 3).

No que se refere às práticas realizadas nas escolas da região, é possível caracterizar as ações pontuais – oficinas e minicursos de curta duração – como pertencentes a um EC2.

¹¹ As ferramentas computacionais e experimentos mentais serão melhor explorados na sessão de Enfoque Instrumental, em que serão descritas as habilidades procedimentais adquiridas nas práticas.

¹² Essa plataforma será melhor explorada na sessão de Enfoque Instrumental.

Isso porque o pouco tempo destinado a essas ações não possibilitou um maior aprofundamento em elementos matemáticos na CQ. Logo, as apresentações se baseiam na explicação de conceitos da CC, MQ e introdução qualitativa a CQ. Para tanto, utilizou-se também de analogias e do *IBM Quantum Composer* para a explicação dos qubits, portas lógicas e algoritmos quânticos, utilizando como elementos matemáticos apenas as representações vetoriais dos qubits e as representações matriciais das portas.

Todavia, ainda que o EC2 permita uma introdução adequada de conteúdos da CQ de modo gradual, há também limitações na prática, uma vez que a interpretação de algoritmos quânticos mais complexos necessita de uma abordagem matemática mais avançada. Nesse sentido, práticas de ensino que utilizam o EC2 pouco avançam em termos de aprendizagem e aplicações. Já as ações que discutem elementos da Matemática na CQ, caracterizadas no presente trabalho como práticas de ensino de **Enfoque Conceitual Analítico**, ou ainda, Enfoque Conceitual de Etapa 3 (EC3), conseguem resultados mais significativos.

Os trabalhos do levantamento caracterizados por essa abordagem são: T2, T3, T6 e T7. Cada trabalho destaca a integração do ensino de CQ com ênfase na matematização, fornecendo uma compreensão mais aprofundada dos fundamentos e aplicações da CQ. No T2, a adição de uma segunda etapa ao workshop aprofunda a discussão dos elementos matemáticos da CQ, proporcionando aos estudantes uma compreensão mais sólida dos fundamentos. O T3, por outro lado, fornece orientação aos professores do EM sugerindo uma abordagem interdisciplinar que incorpora elementos de Física, Matemática e Ciência da Computação. A progressão em três níveis inclui conceitos básicos e aplicações práticas, enquanto a contextualização histórica enriquece a aprendizagem.

Ao utilizar três níveis de ensino, T6 destaca-se por meio de uma abordagem holística que integra lógica, técnica experimental e narrativa. Este trabalho fornece uma compreensão mais ampla da CQ, examinando não apenas os aspectos matemáticos da disciplina, mas também os aspectos experimentais e sociais. Por fim, o T7 realiza uma análise didática básica para encontrar termos e conceitos importantes na literatura. Este trabalho contribui para uma compreensão mais profunda e duradoura dos princípios fundamentais da CQ ao organizar o campo com base em ideias subjacentes a longo prazo. Além disso, consolida a abordagem EC3 como uma ferramenta eficaz no ensino dessa disciplina.

No âmbito das práticas realizadas no presente trabalho, a única ação que se caracteriza como do tipo EC3 é referente ao acompanhamento dos estudantes do PIBIC Júnior, em que houve mais tempo para explorar elementos com ênfase na matematização.

Nesse caso, é preciso ressaltar que uma abordagem EC3, na perspectiva do autor deste trabalho, deve obrigatoriamente passar pela abordagem EC2. Nesse sentido, a prática teve como ponto de partida uma abordagem inteiramente qualitativa da CQ, utilizando analogias e o *IBM Quantum Composer*. As etapas seguintes foram baseadas na exploração das representações matemáticas de qubits e portas lógicas, explorando as suas operações matriciais. A meta principal do EC3 é a transposição desses conceitos para a linguagem de programação *python*, permitindo a construção e desenvolvimento de algoritmos quânticos.

Considerando a análise de trabalhos referente ao Enfoque Conceitual, é possível agrupá-los em três principais subcategorias: EC1 – Enfoque Conceitual "Simplório"; EC2 – Enfoque Conceitual Qualitativo; EC3 – Enfoque Conceitual Analítico. Conforme descrito anteriormente, cada subcategoria tem uma ênfase específica, permitindo explorar diferentes aprendizagens. Essa relação pode ser visualizada no quadro abaixo, que engloba os enfoques, sua descrição e os trabalhos pertencentes a cada categoria.

Quadro 3 – Caracterização de trabalhos referentes a diferentes níveis referentes aos enfoques conceituais.

Enfoque Conceitual	Descrição	Trabalhos/Atividades
"Simplório"	Abordagem incompleta CQ, introduzindo conteúdos de suas áreas basilares de modo incompleto.	T8, T5, T13, T14
Qualitativo	Abordagem introdutória da CQ, explorando conceitos da área, bem como a MQ e CC, de maneira qualitativa.	A1, T1, T9
Analítico	Abordagem mais ampla da CQ, explorando os conceitos da área, bem como da MQ e CC, de modo qualitativo e quantitativo.	A2, T2, T3, T6, T7

Seção 3: Enfoque Instrumental

A produção do conhecimento científico tem experimentado avanços significativos, demandando um crescimento tecnológico concomitante. Na contemporaneidade, grande parte das ciências básicas necessitam de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de suas pesquisas, como o caso da Física. Por outro lado, campos do conhecimento mais recente emergem já possuindo tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC) entrelaçadas em suas bases teóricas, a exemplo da própria CQ. Em virtude disso, a abordagem de

conteúdos da área presente em práticas de ensino (Enfoque Conceitual) está intrinsecamente atrelada às habilidades procedimentais da área, denominada no presente trabalho de Enfoque Instrumental.

De modo análogo aos Enfoques Conceituais, é possível classificar esse tipo de enfoque em diferentes etapas relativas ao contexto de cada prática. Uma primeira etapa consiste na utilização de ferramentas computacionais sem o propósito de construir circuitos quânticos, denominada de **Enfoque Instrumental Ilustrativo**, ou Enfoque Instrumental de Etapa 1 (EI1). Nesse caso, a ênfase é dada à ilustração de conceitos iniciais da MQ, CC ou CQ utilizando TDIC. Como exemplo, é possível citar o trabalho T9, em que explora o tema utilizando o jogo *Entanglion*: os estudantes podem aprender conceitos de CQ, mas não desenvolvem aprendizagens procedimentais referentes à construção dos circuitos. Assim, essas práticas utilizam das TDIC apenas como uma ferramenta para a explicação do conteúdo, não como uma ferramenta de aplicação da área. Os trabalhos T13 e T14 também são identificados nessa categoria, uma vez que utilizam TDIC apenas para ensino de conceitos de MQ e confecção de materiais de divulgação científica.

Para além disso, há ainda outras duas possibilidades de Enfoque Instrumental: uma delas possibilita a criação de circuitos sem a necessidade de programação, denominada **Enfoque Instrumental Representativo**, ou Enfoque Instrumental de Etapa 2 (EI2), e a outra utiliza linguagem de programação para esse propósito, sendo identificada como **Enfoque Instrumental Algorítmico**, ou Enfoque Instrumental de Etapa 3 (EI3). Enquanto o EI1 se distingue por não incorporar TDIC na construção de circuitos quânticos, o EI2 e EI3 se diferenciam em relação à profundidade no desenvolvimento procedimental da abordagem.

No que se refere ao Enfoque Instrumental Representativo (EI2), as ferramentas computacionais empregadas possibilitam efetivamente a construção de algoritmos quânticos sem a necessidade de os estudantes interagirem diretamente com linguagens de programação. A título de exemplo, por meio do IBM Quantum Composer (Figura 3), os estudantes conseguem elaborar circuitos, adicionando qubits, bits clássicos e portas lógicas mediante sua interface gráfica. Os trabalhos identificados na revisão, a saber, T1, T2, T4, T5, T8, T10, T11 e T12, abordam a potencialidade do uso desse tipo de ferramenta para introduzir conceitos fundamentais de Computação Quântica (CQ), sendo categorizados como pertencentes à Ênfase Instrumental Representativa (EI2). Outrossim, as ações do tipo A1, desenvolvidas no escopo deste estudo, também se enquadram nesse enfoque, uma vez que incorporam o IBM Quantum Composer para a criação de circuitos quânticos.

De modo geral, as práticas com esse enfoque elencam como potencialidade mais significativa o fato de não necessitar introduzir noções de lógica de programação para os estudantes devido ao curto tempo das ações. De fato, a falta de proficiência dos estudantes em linguagens de programação pode ser um obstáculo significativo para as práticas de ensino de CQ, tendo em vista as dificuldades associadas ao ensino de programação (Galvão *et al.*, 2022). Logo, com o EI2, é possível enfatizar outros aspectos da prática, como visualização e interpretação dos circuitos por meio da Esfera de Bloch (Figura 1), vetores de estado e histograma como resultados do circuito quântico.

Contudo, a adoção de interfaces gráficas para o desenvolvimento de algoritmos quânticos impõe limitações às suas aplicações, uma vez que a construção de algoritmos robustos, ou aqueles que demandam etapas de pré ou pós-processamento para o tratamento adequado de dados, torna-se inviável. Nessa conjuntura, a incorporação de algoritmos híbridos¹³, os quais representam uma categoria de grande impacto na indústria contemporânea, torna-se impraticável em tais discussões.

No levantamento de trabalhos, os trabalhos T3, T6, T7 e T12 discutem que o desenvolvimento das práticas concretizou-se utilizando a ferramenta *IBM Quantum Lab* para o desenvolvimento de algoritmos por ser uma plataforma online, ou seja, não há necessidade de instalar pacotes específicos no computador. Em geral, os trabalhos não apontaram limitações para o desenvolvimento dos algoritmos com os estudantes, ainda que o tempo destinado para algumas dessas práticas tenha sido relativamente curto. No entanto, é importante ressaltar que os algoritmos desenvolvidos foram, em sua maioria, algoritmos já amplamente utilizados, o que impossibilita analisar se houve uma aprendizagem significativa ou apenas a reprodução de seus códigos fonte.

No contexto das atividades designadas como A2 no escopo da pesquisa, foi possível familiarizar os estudantes com conceitos de lógica de programação da seguinte maneira: i) inicialmente, recorreu-se ao *IBM Quantum Composer* para a elaboração do circuito; ii) procedeu-se à análise desses circuitos com acesso ao código-fonte, uma vez que a plataforma permite essa visualização; iii) de forma sistemática, foram apresentados os princípios fundamentais de comandos de entrada e saída, condicionais e de repetição com ênfase na linguagem *python*. Dessa forma, buscou-se uma introdução progressiva ao conteúdo de programação, visando posterior exploração de algoritmos mais sofisticados. Como resultado,

¹³ Algoritmos que não são construídos utilizando somente operadores quânticos, mas processamento clássico.

os estudantes conseguiram desenvolver seus algoritmos, indicando uma possível aprendizagem significativa de aplicação na área.

De modo geral, é possível categorizar o Enfoque Instrumental em três subcategorias principais: EI1 – Enfoque Instrumental Ilustrativo; EI2 – Enfoque Instrumental Representativo; EI3 – Enfoque Instrumental Algorítmico. Como previamente delineado, cada subcategoria apresenta uma ênfase específica, possibilitando a exploração de diferentes modalidades de aprendizado. Essa relação pode ser visualizada no quadro abaixo, que engloba os enfoques, sua descrição e os trabalhos pertencentes a cada categoria.

Quadro 4 – Caracterização de trabalhos referentes a diferentes níveis referentes aos enfoques instrumentais.

Enfoque Instrumental	Descrição	Trabalhos
Ilustrativo	Utilização de TDIC sem o propósito de construir circuitos quânticos	T9, T13 e T14
Representativo	Utilização de TDIC com o propósito de construir circuitos quânticos sem a programação	T1, T2, T4, T5, T10, T11, T12
Algorítmico	Utilização de TDIC com o propósito de construir circuitos quânticos com a programação	T3, T6, T7, T8, T12

Seção 4: Enfoque Sociocientífico

A Computação Quântica é amplamente representada como um pilar para a segunda revolução tecnológica, desencadeando transformações práticas e impactos sociais significativos (Lars, 2018). Diante desse cenário, as práticas de ensino destinadas à abordagem de conceitos nessa área precisam incluir a interface entre a Computação Quântica (CQ) e as questões sociais. Dessa forma, as ações educativas não devem se restringir à simples construção e interpretação de circuitos quânticos, mas devem também englobar a compreensão dos potenciais impactos da área na sociedade.

Em primeiro plano, apresentar a importância da quebra de paradigma da Computação Clássica para a CQ discutindo seus impactos sociais deve ser a motivação inicial de toda a prática de ensino da área, instigando os estudantes a aprender os seus conceitos fundamentais. Essa é uma questão basilar que deve estar presente em todas as práticas de ensino, perpassando todos os enfoques discutidos até o aqui.

No contexto do *corpus* de análise desta pesquisa, os trabalhos T1, T5, T8, T10 e T12 concentraram-se de maneira proeminente nessa temática. Em linhas gerais, esses trabalhos são caracterizados por ações que priorizam conteúdos de maneira mais objetiva. Além disso, as ações classificadas como A1, também integrantes dessa categoria, adotaram uma abordagem sociocientífica ao explorar os impactos sociais da Computação Quântica (CQ), especialmente em termos da reconfiguração de paradigmas na área, devido à restrição de tempo das práticas. Diante disso, as abordagens com ênfase nessa motivação inicial foram designadas neste trabalho como **Enfoque Sociocientífico Propedêutico**, ou Enfoque Sociocientífico de Etapa 1 (ES1).

Dado que a motivação dos estudantes para prosseguir com os estudos em CQ decorre dos potenciais impactos futuros da área na sociedade, os trabalhos tendem a aprofundar-se em aspectos sociocientíficos, concentrando-se especialmente nas possibilidades de geração de emprego e nos seus impactos industriais e científicos. Assim, os aspectos da CQ são abordados de maneira integrada aos elementos internos à C&T, englobando o questionamento de problemas fundamentais da ciência, a produção de conhecimento científico e a socialização do conhecimento produzido com a comunidade científica. Nesse contexto, práticas com esse tipo de ênfase internalista são categorizadas como pertencentes ao tipo **Enfoque Sociocientífico Internalista**, ou Enfoque Sociocientífico de Etapa 2 (ES2).

Com relação ao levantamento realizado, os trabalhos caracterizados por esse enfoque são: T2, T3, T4, T6, T7, T9, T11, T13 e T14. Conforme dito anteriormente, as práticas tendem a enfatizar esses aspectos sociocientíficos, de modo a motivar os estudantes no estudo da área. No entanto, os trabalhos têm um aprofundamento diferente mesmo caracterizados por um mesmo enfoque: T4 e T11 abordam aspectos internos da C&T apenas em termos de possibilidades de carreiras de trabalho; T2, T3, T6, T10 abordam em termos de aplicação industrial; T4, T7, T9, T13 e T14 conseguem, para além disso, explorar aplicações genuinamente científicas.

Dentro do escopo das atividades realizadas, as ações designadas como A2 também se enquadram nessa categorização, uma vez que visam desenvolver atitudes e valores intrínsecos à dinâmica da produção do conhecimento científico. Segundo Silva e Sasseron (2021), aspectos internalistas da ciência envolvem o questionamento, argumentação e divulgação do trabalho desenvolvido com a comunidade científica. Esses objetivos foram alcançados na prática, uma vez que os estudantes conseguiram desenvolver seus projetos e socializar esse conhecimento em eventos de Física, por meio de trabalhos aceitos.

Todavia, uma abordagem exclusivamente internalista da CQ, focada apenas nas questões técnicas, pode apresentar muitas restrições. Considerações éticas, sociais e culturais, conforme discutido anteriormente, não levadas em consideração podem resultar em problemas como desafios éticos não resolvidos, desigualdades no acesso à tecnologia quântica, resistência pública, efeitos econômicos desconsiderados e falta de contextualização cultural. Um método externalista é necessário para garantir que o desenvolvimento da CQ seja moral, inclusivo e socialmente responsável. Isso poderia evitar os efeitos negativos e promover a aceitação mais ampla e sustentável da tecnologia. No presente trabalho, uma abordagem preocupada com essa formação é denominada de **Enfoque Sociocientífico Integrado**, ou Enfoque Sociocientífico de Etapa 3 (ES3).

Para esse último enfoque, nenhum trabalho presente no *corpus* de análise da pesquisa é identificado por esse tipo de enfoque. Entre os trabalhos, aqueles que mais se aproximaram dessa perspectiva são o T13 e o T14. Contudo, ao caracterizá-los como EC1 e EI2, há um afastamento do ES3. De fato, não é viável compreender as interações sociocientíficas no domínio sem uma abordagem conceitual e instrumental que explore aspectos mais intrínsecos à C&T. Conforme argumentam Silva e Sasseron (2022), uma abordagem externalista requer uma abordagem internalista preexistente.

Isso pode ser o resultado de várias características distintas da Computação Quântica (CQ). Para começar, os estudantes podem encontrar desafios ao usar abordagens que exigem um entendimento mais completo e contextualizado das consequências sociocientíficas da CQ porque esta é uma área relativamente nova. Outrossim, isso também pode ser resultado das dificuldades de estabelecer conexões significativas entre os tópicos quânticos e questões sociais mais abrangentes. O foco predominante dos estudantes em seus objetivos acadêmicos e profissionais também pode ser um fator relevante, pois pode tornar os estudantes menos interessados em métodos que vão além da CQ. Em geral, esses elementos têm o potencial de influenciar a preferência por abordagens conceituais e instrumentais, desviando-se de uma ótica externalista que exige uma compreensão prévia.

Considerando a discussão efetuada, é viável categorizar o Enfoque Sociocientífico em três subcategorias principais: ES1 – Enfoque Sociocientífico Propedêutico; ES2 – Enfoque Sociocientífico Internalista; ES3 – Enfoque Sociocientífico Integrado. Conforme delineado anteriormente, cada subcategoria apresenta uma ênfase específica, permitindo a exploração de distintas modalidades de aprendizado. Essa relação está representada de forma

clara no quadro abaixo, que abarca os enfoques, suas descrições e os trabalhos associados a cada categoria.

Quadro 5 – Caracterização de trabalhos referentes a diferentes níveis referentes aos enfoques instrumentais.

Enfoque Sociocientífico	Descrição	Trabalhos
Propedêutico	Abordagem introdutória dos impactos da CQ na sociedade	T1, T5, T8, T10, T12, A1
Internalista	Abordagem da CQ em termos de elementos internos à produção do conhecimento científico	T2,T3, T4, T6, T7, T9, T11, T13, T14, A2
Integrado	Abordagem da CQ em termos de elementos internos e externos à produção do conhecimento científico	-

Seção 5: Matriz Orientadora para o Ensino de Computação Quântica no Ensino Médio

Realizadas as discussões dos enfoques em termos de alcances de conteúdo (Enfoque Conceitual), exploração de ferramentas computacionais (Enfoque Instrumental) e articulação com o contexto social (Enfoque Sociocientífico), esta seção tem o objetivo de traçar novos significados a partir desses resultados. Para tanto, busca-se articular esses enfoques diferentes considerando a demarcação das suas etapas: os enfoques da etapa 1 (EC1, EI1, ES1) visam apresentar aos estudantes discussões iniciais da área; os enfoques da etapa 2 (EC2, EI2, ES2) oferecem recursos abrangentes para uma compreensão geral da área; os enfoques da etapa 3 (EC3, EI3, ES3) proporcionam uma aprendizagem genuinamente efetiva aos estudantes, seja em termos de conteúdos, habilidades procedimentais e atitudes.

Nesse sentido, a delimitação das etapas auxilia na identificação de práticas em uma perspectiva mais abrangente. Entretanto, é crucial ressaltar que, ainda que os diferentes enfoques sejam agrupados em etapas que melhor descrevem suas características, as práticas de ensino de CQ para o EM não necessariamente devem ser interpretadas como inteiramente pertencentes a essas etapas, uma vez que podem ter enfoques diferentes de etapas distintas. Assim, as etapas não devem ser interpretadas como extremos que definem o processo de aprendizagem dos estudantes em sua totalidade, mas como pontos de referência em um contexto de análise dos objetivos formativos das práticas de ensino de CQ para o EM.

No caso dos enfoques pertencentes à etapa 1, seus objetivos enfatizam o caráter informativo das práticas, uma vez que a abordagem dos conteúdos é insuficiente para uma

apresentação consistente da CQ. Se comparados aos objetivos de ACT apresentados no trabalho de Silva e Sasseron (2021) (Figura 2), trabalhos nessa etapa alcançam apenas parcialmente aspectos conceituais da Visão I, visto que conseguem sequer alcançar parâmetros formativos tradicionalmente discutidos, como uma formação mais técnica. Nesse contexto, enfoques pertencentes a essa etapa são caracterizados por um objetivo de **Aprendizagem para Informação**.

Considerando esses elementos, foi elaborado um quadro que organiza os objetos de conhecimento, sejam conteúdos, TDIC ou problemáticas sociais, de acordo com cada subcategoria de enfoque conceitual abordada (Quadro 4). O propósito subjacente é proporcionar diretrizes para potenciais práticas de ensino de CQ no EM, levando em consideração as particularidades de cada abordagem.

Quadro 6 – Quadro com os objeto de conhecimento da Etapa 1.

Enfoque	Objetos de Conhecimento
EC1	Esse enfoque pode ter objetos de conhecimento do EC2, e até mesmo do EC3, tendo como diferencial a ênfase excessiva em apenas uma das áreas basilares: MQ ou CC.
EI1	• <i>Geering Up QC Camp Studio</i>: laboratório virtual para ensinar CQ de maneira interativa. Disponível em <https://scratch.mit.edu/studios/27046227/>. • <i>Quantum Game</i>: jogo utilizado para ensinar sobreposição e emaranhamento. Disponível <https://quantumgame.io/> • Quantum Jump: Um jogo arcade para ensinar vocabulários da área. Disponível em <https://openprocessing.org/sketch/815868>.
ES1	• Como a diferença entre o significado da quebra de paradigma entre a CQ e a Computação Clássica pode influenciar na resolução de problemas da atualidade?

No que se refere aos enfoques de etapa 2, é possível alcançar elementos da Visão II, visto que conseguem introduzir os conteúdos da CQ de modo satisfatório, proporcionando reflexões sobre as potencialidades e limitações da área. Nesse caso, as práticas conseguem introduzir os conteúdos da FMC, assim como a abordagem da temática, a partir de um panorama geral inicial, desenvolvendo habilidades procedimentais de construção de circuito e

trabalhando aspectos sociais mais amplos. Em conjunto, esses elementos são capazes de cumprir com um objetivo de **Aprendizagem para Questionamento**: os estudantes conseguem refletir sobre a área articulando as características de diferentes enfoques. De modo análogo aos enfoques de etapa 1, foi organizado um quadro com o objetivo de nortear práticas que pretendem alcançar esse objetivo de aprendizagem.

Quadro 7 – Quadro com os objetivos de conhecimento da Etapa 2

Enfoque	Objetos de Conhecimento
EC2	Mecânica Quântica • Bases teórico-experimentais da Mecânica Quântica: radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, radiação compton, átomo de Bohr. • Dualidade onda partícula: experimento da fenda dupla; • Impacto da MQ no desenvolvimento de recursos tecnológicos; • Sistemas Quânticos de dois níveis: os qubits. Ciência da Computação • Origem dos Computadores: do Eniac ao Frontier; • Impactos da revolução tecnológica na sociedade; • Lei de Moore; Computação Quântica • Qubit como unidade básica de informação; • Portas lógicas quânticas; • Arquitetura de computadores quânticos; • Impacto da CQ na sociedade.
EI2	• <i>IBM Quantum Composer</i>: Plataforma que permite a construção de algoritmos quânticos apenas com elementos da interface. Disponível em <https://quantum.ibm.com/>.
ES2	• Quais os impactos da criptografia quântica na segurança das informações? • Quais os impactos de algoritmos de busca no desenvolvimento de sistemas de logística? • Quais os impactos da CQ na melhoria de sistemas de Inteligência

	Artificial? • Como algoritmos quânticos podem impactar na produção de novos fármacos? • Por que é mais viável simular sistemas quânticos com algoritmos quânticos?
--	--

Referente aos enfoques de etapa 3, ainda haja o alcance pleno dos aspectos conceituais da Visão II, eles não necessariamente implicam em um alcance completo dos elementos da Visão III. Isso pode ser o resultado de várias características distintas da CQ. Primeiramente, os estudantes podem encontrar desafios ao usar abordagens que exigem um entendimento mais completo e contextualizado das consequências sociocientíficas da CQ porque esta é uma área relativamente nova. Em geral, esses elementos têm o potencial de influenciar a preferência por abordagens conceituais e instrumentais, desviando-se de uma ótica externalista que exige uma compreensão prévia. No entanto, ainda que não haja um alcance genuíno dessa visão, essa etapa é capaz de promover uma **Aprendizagem para Tomada de Decisões** de modo significativo.

Com base nesses componentes, desenvolveu-se um quadro que estrutura os objetos de conhecimento da etapa 3 (Quadro 3). A intenção subjacente é oferecer orientações para possíveis estratégias de ensino de CQ para EM, considerando as nuances de cada abordagem.

Quadro 9 – Quadro com os objetos de conhecimento da Etapa 1.

Enfoque	Objetos de Conhecimento
EC3	Mecânica Quântica • Interpretação de Copenhague: descrição probabilística de sistemas quânticos; • Notação de Dirac para vetores e operadores quânticos; • Postulados da MQ. Ciência da Computação • Linguagem de programação python; • Álgebra booleana; • Complexidade computacional dos algoritmos.

	Computação Quântica • Representação de qubits e portas lógicas na notação de Dirac; • Esfera de Bloch e histogramas; • Operações de álgebra linear e estatística; • Impacto social, econômico, científico e tecnológico de algoritmos quânticos na sociedade.
EI3	• <i>IBM Quantum Lab</i>: plataforma online para o desenvolvimento de códigos utilizando a biblioteca qiskit. Disponível em <https://quantum.ibm.com/> • <i>Anaconda Navigator</i>: pacote de instalação contendo aplicativos capazes de desenvolver algoritmos quânticos localmente no computador. Disponível em <https://docs.anaconda.com/free/navigator/index.html>
ES3	• Quais as problemáticas de algoritmos de criptografia quântica capazes de quebrar chaves de protocolos de comunicação? • Como países subdesenvolvidos podem ser afetados pelo desenvolvimento da CQ? • Quais os impactos na desvalorização de outras profissões a CQ pode gerar?

Considerando esses aspectos e significados emergentes da análise, foi construída uma matriz para organizar as relações discutidas no presente trabalho em termos de objetivos da aprendizagem e diferentes enfoques (Quadro 10). A matriz representa a consolidação das pesquisas em termos de parâmetros e objetivos formativos referentes à perspectiva do autor do presente trabalho.

Quadro 10 – Matriz Orientadora de práticas de ensino de CQ para o EM

Objetivos de aprendizagem	Enfoque Conceitual	Enfoque Instrumental	Enfoque Sociocientífico
Para Informação	EC1	EI1	ES1
Para Questionamento	EC2	EI2	ES2
Para Tomada de Decisão	EC3	EI3	ES3

O Quadro 10 articula os enfoques com diferentes objetivos de aprendizagem, agrupando-os com relação às suas respectivas etapas. Conforme discutido anteriormente, é importante destacar dois elementos na interpretação da matriz: 1) as etapas não necessariamente são níveis a serem alcançados; 2) práticas de ensino de CQ não necessariamente são pertencentes a uma mesma etapa, uma vez que podem atingir diferentes enfoques em etapas distintas. No primeiro ponto, é importante perceber que o alcance de enfoques de etapa 3 não implica em dizer que o trabalho perpassou pelas etapas anteriores. Cada estágio possui características singulares únicas, e o progresso não é necessariamente sequencial. No entanto, conteúdos de etapas anteriores podem estar presentes nas etapas posteriores, visto que, em alguns casos, elas se diferenciam em termos de aprofundamento em aspectos de cada enfoque.

No segundo ponto, é possível citar as ações do tipo A1 e A2 como exemplo. No caso das ações do tipo A1, ainda que os enfoques EC2 e EI2 tenham sido atingidos, não é possível afirmar a prática alcançou genuinamente uma aprendizagem para tomada de decisões, uma vez que não foram articuladas questões sociais mais amplas da área (ES2) que poderiam contribuir para o desenvolvimento de um pensamento reflexivo. Já as ações do tipo A2, ainda que tenham atingido o EC3 e EI3, não podem ser caracterizadas como inteiramente promotoras de uma aprendizagem para participação, tendo em vista que a falta de problematizações pertencentes a um ES3. No entanto, é importante afirmar que ambas se aproximaram mais das etapas 2 e 3, respectivamente, do que de etapas anteriores, visto que alcançaram um maior número de enfoques pertencentes a elas.

Portanto, a matriz resultante desta pesquisa emerge como um instrumento abrangente para orientar as práticas de ensino de CQ para o EM na perspectiva dos autores do presente trabalho. Assim, ela não apenas organiza de maneira sistemática os enfoques conceitual, instrumental e sociocientífico em consonância com objetivos específicos, mas também enfatiza a complexidade e interconexão inerentes a essas abordagens. Ao superar uma interpretação linear, a matriz oferece uma visão dinâmica do processo educacional, destacando a importância única de cada etapa e a possibilidade de atingir enfoques diversos em momentos distintos. Nesse sentido, a matriz não apenas encerra este estudo como uma conclusão analítica, mas também se apresenta como um instrumento orientador de práticas, proporcionando parâmetros e propósitos para a inserção da CQ no ambiente do EM.

CAPÍTULO 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

As discussões realizadas na presente pesquisa emergiram de um processo de identificação de diferentes alcances das práticas em termos de potencialidades e limitações exploradas em diferentes contextos de aprendizagem. Como ponto de partida, constatou-se que as práticas de ensino de CQ para o EM tinham diferentes enfoques associados a três dimensões: Conceitual, Instrumental e Sociocientífica. Isso porque esses enfoques compõem habilidades de aprendizagem referentes a características específicas das práticas. Para cada enfoque, foram elencadas etapas, de modo a caracterizar a abordagem dessas dimensões a partir de parâmetros de referência.

No caso do Enfoque Conceitual, sua abordagem enfatiza elementos dos próprios conteúdos da CQ e de suas bases teóricas. As diferentes etapas desse enfoque identificam a articulação dos conceitos da área e o grau de profundidade com que foram abordados: enquanto a definição dos enfoques EC2 e EC3 se diferencia em termos de profundidade, o EC1 tem como característica principal uma abordagem que não parte do ensino da CQ, mas que a secundariza a partir de uma abordagem mais técnica da CC ou mais conceitual da MQ. Nesse contexto, o EC2 pode ser interpretado como uma etapa anterior ao EC3, enquanto que o EC1 não se relaciona com os demais enfoques de maneira direta.

Para o Enfoque Instrumental, esses propósitos são pensados em termos de habilidades procedimentais desenvolvidas nas práticas de ensino de CQ. Diferentemente dos demais enfoques, ele pode ser, de fato, interpretado como algo progressivo: O EI1 se refere à utilização de TDIC sem o propósito de construir algoritmos quânticos; o EI2 permite a construção de modo gráfico; o EI3 trabalha com a construção de algoritmos utilizando linguagem de programação. Assim, uma prática adequada de ensino de CQ poderia perpassar por todos esses enfoques de modo gradual.

Já o Enfoque Sociocientífico se associa com objetivos formativos de atitudes e valores nos estudantes, propiciando uma aprendizagem crítica-reflexiva de conceitos da CQ. Isso porque a abordagem de conceitos de maneira desvinculada de seus impactos sociais, além de limitar a aprendizagem, pode implicar em uma desmotivação dos estudantes para a continuidade nos estudos da área. Com isso, sua abordagem pode ser feita em termos de diferentes etapas. No caso do ES1 e ES2, a sua diferenciação está em termos de profundidade, visto que o primeiro apresenta os impactos sociais da CQ na sociedade em termos gerais, enquanto que o segundo aborda esses impactos em áreas mais específicas. No ES3, as

problemáticas são apresentadas levando em consideração não apenas o impacto da CQ no contexto científico e industrial, mas também no contexto sociopolítico.

Esses aspectos foram, então, categorizados como a base, ou eixos, de uma matriz de orientação, construída a partir de um estudo de natureza teórica de diferentes referenciais da área de Ensino de Ciências e Educação, bem como de natureza prática da análise de ações de ensino de CQ para o EM. Em função disso, articularam-se diferentes enfoques, que levaram à definição de três objetivos de aprendizagem. O primeiro, associado a uma Aprendizagem para a Informação, contribui para apresentar aos estudantes elementos básicos da CQ. O segundo, referente a uma Aprendizagem para Questionamento, fornece aos estudantes o conhecimento básico necessário para refletir a área em termos de impactos na indústria, ciência e mercado de trabalho. O terceiro, relativo a uma Aprendizagem para Tomada de Decisões, implica em uma formação genuinamente crítica dos estudantes em termos de aprendizagem conceitual, procedimental e de reflexão social da prática.

Salienta-se que esses enfoques e objetivos de aprendizagem devem ser compreendidos como complementares no âmbito da formação científica, correspondendo a diferentes situações, contextos escolares e possibilidades de atuação, ou mesmo a momentos sucessivos de apropriação de intenções. Dessa forma, visa-se viabilizar o resgate de aspectos e discussões negligenciadas ao longo da trajetória das pesquisas em ensino de CQ no EM desenvolvidas nesse contexto.

Contudo, a caracterização apresentada não deve ser interpretada como apenas mais uma forma de classificar trabalhos relacionados às práticas de ensino no EM. Assim, sua contribuição está ligada à capacidade de reconhecer as várias dimensões que estão sendo consideradas ou que podem vir a ser consideradas em diferentes práticas. Ao mesmo tempo, esse reconhecimento permite uma compreensão mais ampla dos significados e perspectivas das abordagens no contexto do ensino de Física, mais especificamente de CQ para o EM, no Brasil. Isso ajuda a definir e escolher quais elementos devem ser priorizados nas práticas, sejam elas em ações de divulgação, sejam elas em práticas escolares.

Em particular, pretende-se que esse quadro possa fornecer orientações em que os trabalhos e propostas possam situar-se, reconhecendo suas especificidades. Simultaneamente, acredita-se que, por meio dessa organização sistemática, seja possível expandir as possibilidades das abordagens de CQ para o EM. Em outras palavras, essa matriz de abordagens permite identificar e posicionar intenções, buscando coerência entre as considerações em si. A partir dela, torna-se viável elucidar razões para escolhas,

direcionamentos, limitações e potencialidades de diversas propostas. Espera-se que seja um instrumento relevante para reflexão sobre tais práticas e suas conexões com os discursos, um aspecto a ser aprofundado em investigações futuras.

Portanto, a matriz orientadora auxilia nas reflexões das práticas de ensino da Física/Ciências, de modo a alinhar os seus objetivos com os alcances formativos buscados desde o planejamento das ações. Nesse sentido, considera-se os diferentes enfoques e os seus objetos de conhecimento para a promoção de uma prática que se aproxima de uma aprendizagem para informação, questionamentos ou tomada de decisões. Aspectos como tempo de duração das práticas, conteúdos abordados, TDIC disponíveis contribuem de forma significativa no processo de repensar as práticas. Desse modo, suas contribuições residem tanto em uma perspectiva de orientações para pesquisa no campo de Ensino de Ciências, quanto em termos de orientações para práticas de ensino na Educação Básica.

REFERÊNCIAS

- Ain, W. Et Al. Quantum Cryptography Trends: A Milestone In Information Security. In: **International Conference On Hybrid Intelligent Systems**. Springer, Cham, 2016. P. 25-39.
- Araújo, Rodrigo; Zago, Letícia. Física Moderna E Contemporânea Nos Cursos De Licenciatura Em Física: Uma Análise Das Marcas Da Racionalidade Técnica. **Latin-American Journal Of Physics Education**, V. 10, N. 4, P. 7, 2016.
- Aron, Jacob. Ibm Unveils Its First Commercial Quantum Computer. **Science News**. 08 De Jan 2019. Disponível Em <<https://www.newscientist.com/article/2189909-ibm-unveils-its-first-commercial-quantum-computer/>>. Acesso Em 15 De Jul 2022.
- Auler, Décio; Delizoicov, Demétrio. Alfabetização Científico-Tecnológica Para Quê?. **Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)**, V. 3, N. 2, P. 122-134, 2001.
- Auler, Décio. Enfoque Ciência-Tecnologia-Sociedade: Pressupostos Para O Contexto Brasileiro. **Ciência & Ensino**, V. 1, N. Esp, P. 1-20, 2007.
- Biazus, Marivane De Oliveria; Da Rosa, Cleci T. Werner. Abordagem De Tópicos De Mecânica Quântica No Ensino Médio Partindo Da Aproximação Com O Cotidiano. **Experiências Em Ensino De Ciências**, V. 11, N. 3, P. 159-177, 2016.
- Brasil. Ministério Da Educação. Secretaria Da Educação Básica. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, Df, 2018. Disponível Em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/#/site/inicio>>. Acesso Em: Dez. 2016.
- Cardoso, Andiara Pereira; Ferrari, Paulo Celso; De Almeida, Norton Gomes. Potencialidades Da Computação Quântica Problematizada Para Discutir Ciência, Tecnologia E Sociedade. **Experiências Em Ensino De Ciências**, V. 14, N. 2, P. 49-70, 2019.
- Cao, Yudong Et Al. Quantum Chemistry In The Age Of Quantum Computing. **Chemical Reviews**, V. 119, N. 19, P. 10856-10915, 2019.
- Caruso, Francisco; Oguri, Vitor. **Física Moderna: Origens Clássicas E Fundamentos Quânticos**. 2º Edição. São Paulo: Ltc, 2016.
- Conover; Emily. Google Moves Toward Quantum Supremacy With 72-Qubit Computer. **Science News**. 05 De Mar 2018. Disponível Em <<https://www.sciencenews.org/article/google-moves-toward-quantum-supremacy-72-qubit-computer>>. Acesso Em 15 De Jul 2022.
- Contreras, José. **Autonomia De Professores**. Tradução De Sandra Trabucco Valenzuela; Revisão Técnica, Apresentação E Notas À Edição Brasileira De Selma Garrido Pimenta. São Paulo: Cortez, 2002.
- Eisberg, Robert; Resnick, Robert. **Física Quântica**, Ed. Campus, Rio De Janeiro, 1979.
- Galvão, Lucas Et Al. O Uso Do Python Na Construção De Simuladores Computacionais: Proposições E Potencialidades Para O Ensino De Física. **Caderno Brasileiro De Ensino De Física**, V. 39, N. 1, P. 204-237, 2022.
- Gisin, Nicolas Et Al. Quantum Cryptography. **Reviews Of Modern Physics**, V. 74, N. 1, P. 145, 2002.
- Gerhardt, Tatiana Engel; Silveira, Denise Tolfo. **Métodos De Pesquisa**. Plageder, 2009.

- Gil, A. C. **Como Elaborar Projetos De Pesquisa**. 4. Ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- Greca, Ileana Maria; Moreira, Marco Antonio; Herscovitz, Victoria E. Uma Proposta Para O Ensino De Mecânica Quântica. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, V. 23, P. 444-457, 2001.
- Fávero, Eliane Maria De Bortoli. **Organização E Arquitetura De Computadores**. 2016.
- Filho, Clézio. **História Da Computação: O Caminho Do Pensamento E Da Tecnologia**. Edipucrs, 2007.
- Grover, Lov K. A Fast Quantum Mechanical Algorithm For Database Search. In: **Proceedings Of The Twenty-Eighth Annual Acm Symposium On Theory Of Computing**. 1996. P. 212-219.
- Harrow, Aram W.; Hassidim, Avinatan; Lloyd, Seth. Quantum Algorithm For Linear Systems Of Equations. **Physical Review Letters**, V. 103, N. 15, P. 150502, 2009.
- Heim, Bettina Et Al. Quantum Programming Languages. **Nature Reviews Physics**, V. 2, N. 12, P. 709-722, 2020.
- Ibm. **Ibm Quantum Experience**. Disponível Em <<https://quantum-computing.ibm.com/>>. Acesso Em: 15 De Jul 2022.
- Igeta, K.; Yamamoto, Y. Quantum Mechanical Computers With Single Atom And Photon Fields. In: **International Quantum Electronics Conference**. Optica Publishing Group, 1988.
- Kleppner, Daniel; Jackiw, Roman. One Hundred Years Of Quantum Physics. **Science**, V. 289, N. 5481, P. 893-898, 2000.
- Kreuger, Sarah Berrios; Ramos, Paula. Concepções De Cidadania Na Educação Em Ciências: O Que Dizem Os Projetos Político-Pedagógicos E Os Professores De Escolas Municipais De Petrópolis-Rj. **Ensaio Pesquisa Em Educação Em Ciências (Belo Horizonte)**, V. 19, 2017.
- Ladvánszky, J. **Overview On Quantum Entanglement**. 2019.
- Lars, J. The Second Quantum Revolution: From Entanglement To Quantum Computing And Other Super-Technologies. **Springer**, 2018.
- Lino, A. (2010). **Inserção De Física Moderna E Contemporânea No Ensino Médio: A Ligação Entre Teorias Clássicas E Modernas Sob A Perspectiva Da Aprendizagem Significativa**. 2010. Dissertação (Mestrado Em Educação Para A Ciência E A Matemática). Universidade Estadual De Maringá.
- Luna, Sergio Vasconcelos. **Planejamento De Pesquisa: Uma Introdução**. São Paulo: Educ, 1997.
- Machado, D. I. **Construção De Conceitos De Física Moderna E Sobre A Natureza Da Ciência Com O Suporte Da Hipermídia**. 2006. 300 F. Tese (Doutorado Em Educação Para A Ciência). Faculdade De Ciências, Unesp, Bauru, 2006.
- Matthews, Michael S. História, Filosofia E Ensino De Ciências: A Tendência Atual De Reaproximação. **Caderno Brasileiro De Ensino De Física**, V. 12, N. 3, P. 164-214, 1995.
- Monteiro, Maria Amélia; Nardi, Roberto; Bastos Filho, Jenner Barretto. A Sistemática Incompreensão Da Teoria Quântica E As Dificuldades Dos Professores Na Introdução Da Física Moderna E Contemporânea No Ensino Médio. **Ciência & Educação (Bauru)**, V. 15, N. 3, P. 557-580, 2009.
- Monteiro, Maria Amélia; Nardi, Roberto; Bastos Filho, Jenner Barretto. Física Moderna E

Contemporânea No Ensino Médio E A Formação De Professores: Desencontros Com A Ação Comunicativa E A Ação Dialógica Emancipatória. **Revista Electrónica De Investigación En Educación En Ciencias**, V. 8, N. 1, P. 1-13, 2013.

Moraes, Roque. Uma Tempestade De Luz: A Compreensão Possibilitada Pela Análise Textual Discursiva. **Ciência & Educação (Bauru)**, V. 9, P. 191-211, 2003.

Moreira, Marco Antonio. Pesquisa Em Ensino: Aspectos Metodológicos. **Actas Del Pidec: Programa Internacional De Doctorado En Enseñanza De Las Ciencias**, V. 5, P. 101-136, 2003.

Moreira, Marco Antônio. Partículas E Interações. **Física Na Escola**, V. 5, N. 2, P. 10-14, 2004.

Moreira, Marco Antonio. Uma Análise Crítica Do Ensino De Física. **Estudos Avançados**, V. 32, P. 73-80, 2018.

Moreira, Marco Antonio. Desafios No Ensino Da Física. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, V. 43, 2021.

Mugnaini, Rogério; Strehl, Letícia. Recuperação E Impacto Da Produção Científica Na Era Google: Uma Análise Comparativa Entre O Google Acadêmico E A Web Of Science. **Encontros Bibli: Revista Eletrônica De Biblioteconomia E Ciência Da Informação**, N. Esp, P. 92-105, 2008.

Nielsen, Michael A.; Chuang, Isaac L. **Quantum Computation And Quantum Information**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

Oliveira, Fabio Ferreira De; Vianna, Deise Miranda; Gerbassi, Reuber Scofano. Física Moderna No Ensino Médio: O Que Dizem Os Professores. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, V. 29, P. 447-454, 2007.

Ostermann, Fernanda; Moreira, Marco Antonio. Uma Revisão Bibliográfica Sobre A Área De Pesquisa “Física Moderna E Contemporânea No Ensino Médio”. **Investigações Em Ensino De Ciências**, V. 5, N. 1, P. 23-48, 2000.

Paulo, I. J. C. (2006). **A Aprendizagem Significativa Crítica De Conceitos De Mecânica Quântica Segundo A Interpretação De Copenhague E O Problema Da Diversidade De Propostas De Inserção De Física Moderna E Contemporânea No Ensino Médio**. 235 F. Tese (Doutorado Em Educação) – Departamento De Didáticas Específicas – Universidade De Burgos, Burgos, Espanha.

Pena, Fábio Luís Alves. Por Que, Apesar Do Grande Avanço Da Pesquisa Acadêmica Sobre Ensino De Física No Brasil, Ainda Há Pouca Aplicação Dos Resultados Em Sala De Aula?. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, V. 26, P. 293-295, 2004.

Pena, Fábio Luís Alves. Por Que, Nós Professores De Física Do Ensino Médio, Devemos Inserir Tópicos E Idéias De Física Moderna E Contemporânea Na Sala De Aula?. **Revista Brasileira De Ensino De Física**, V. 28, N. 1, P. 1-2, 2006.

Pereira, Adriana Soares Et Al. **Metodologia Da Pesquisa Científica**. 2018.

Pereira, Alexsandro P.; Ostermann, Fernanda. Sobre O Ensino De Física Moderna E Contemporânea: Uma Revisão Da Produção Acadêmica Recente. **Investigações Em Ensino De Ciências**, V. 14, N. 3, P. 393-420, 2016.

Pinheiro, Lisiane Araújo. **Partículas Elementares E Interações Fundamentais No Ensino Médio**. Dissertação (Mestrado Profissional Em Ensino De Física). Faculdade De Física,

Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, P. 1-312. 2011.

Rawat, Bhupesh Et Al. Quantum Computing And Ai: Impacts & Possibilities. **Adi Journal On Recent Innovation**, V. 3, N. 2, P. 202-207, 2022.

Roberts, D. (2011). Competing Visions Of Scientific Literacy: The Influence Of A Science Curriculum Policy Image. In C. Linder, L. Ostman, D. Roberts, P. O. Wickmann, G. D. Erickson, & A. Mckinnon (Org.). **Exploring The Landscape Of Scientific Literacy** (Pp.11-27). New York/ Usa: Routledge/Taylor And Francis

Sabino, Aline Ribeiro; Pietrocola, Maurício. Saberes Docentes Desenvolvidos Por Professores Do Ensino Médio: Um Estudo De Caso Com A Inserção Da Física Moderna. **Investigações Em Ensino De Ciências**, V. 21, N. 2, P. 200-216, 2016.

Dos Santos, Andiará P.; Ferrari, Paulo C.; De Almeida, Norton G. Educação Problematicadora No Ensino De Computação Quântica: Um Caminho Para A Alfabetização Científica E Tecnológica. In: Encontro Nacional De Pesquisa Em Ensino De Ciências (08, 2011: Campinas, Sp). **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira De Pesquisa Em Educação Em Ciências, 2011.

Dos Santos Cardoso, Andiará Pereira; Ferrari, Paulo Celso; De Almeida, Norton Gomes. Potencialidades Da Computação Quântica Problematicada Para Discutir Ciência, Tecnologia E Sociedade. **Experiências Em Ensino De Ciências**, V. 14, N. 2, P. 49-70, 2019.

Sasseron, Lúcia Helena; Carvalho, Amp De. Alfabetização Científica: Uma Revisão Bibliográfica. **Investigações Em Ensino De Ciências**, V. 16, N. 1, P. 59-77, 2011.

Sedra, Adel S. Et Al. **Microelectronic Circuits**. New York: Oxford University Press, 2004.

Valladares, Liliana. Scientific Literacy And Social Transformation: Critical Perspectives About Science Participation And Emancipation. **Science & Education**, V. 30, N. 3, P. 557-587, 2021.

Da Silva, João Ricardo Neves; Arengi, Luis Eduardo Birello; Lino, Alex. Porque Inserir Física Moderna E Contemporânea No Ensino Médio? Uma Revisão Das Justificativas Dos Trabalhos Acadêmicos. **Revista Brasileira De Ensino De Ciência E Tecnologia**, V. 6, N. 1, 2013.

Silva, Tomaz Tadeu Da. **Documentos De Identidade**: Uma Introdução Às Teorias Do Currículo. 3. Ed. Belo Horizonte: Autêntica, 1996.

Silveira, Rosemari Mcf; Bazzo, Walter Antonio. Ciência E Tecnologia: Transformando O Homem E Sua Relação Com O Mundo. **Revista Gestão Industrial**, V. 2, N. 2, 2006.

Singh, Jasmeet; Singh, Mohit. Evolution In Quantum Computing. In: 2016 International Conference System Modeling & Advancement In Research Trends (Smart). **Ieee**, 2016. P. 267-270.

Shor, Peter W. Algorithms For Quantum Computation: Discrete Logarithms And Factoring. In: Proceedings 35th Annual Symposium On Foundations Of Computer Science. **Ieee**, 1994. P. 124-134.

Strieder, Roseline Beatriz; Kawamura, Maria Regina. Educação Cts: Parâmetros E Propósitos Brasileiros. **Alexandria: Revista De Educação Em Ciência E Tecnologia**, V. 10, N. 1, P. 27-56, 2017.

Teixeira, Paulo Marcelo M.; Neto, Jorge Megid. Sobre A Pesquisa-Ação Nas Dissertações E Teses Em Ensino De Biologia (1972-2011). **Alexandria: Revista De Educação Em Ciência E**

Tecnologia, V. 11, N. 1, P. 283-308, 2018.

Terrazzan, Eduardo Adolfo. A Inserção Da Física Moderna E Contemporânea No Ensino De Física Na Escola De 2º Grau. **Caderno Brasileiro De Ensino De Física**, V. 9, N. 3, P. 209-214, 1992.

TURING, Alan Mathison et al. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. **J. of Math**, v. 58, n. 345-363, p. 5, 1936.

Unesco. **Alfabetização Científica Para Todos**: Guia Para A Declaração De Godel. Paris: Unesco, 2017.

Webber, Márcia Cândida Montano. **Inserção De Mecânica Quântica No Ensino Médio**: Uma Proposta Para Professores. Dissertação (Mestrado Profissional Em Ensino De Física). Faculdade De Física, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre, P. 1-136. 2006.

Wolf, Ronald. The Potential Impact Of Quantum Computers On Society. **Ethics And Information Technology**, V. 19, P. 271-276, 2017.

Zabala, Antoni. **A Prática Educativa**: Como Ensinar. Penso Editora, 2015.

APÊNDICE 1: Linha histórica com as principais descobertas e formulações da MQ, CC e CQ

Quando?	Descobertas/Formulações	Referência(s)
1900	Max Planck propõe uma solução para a “catástrofe do ultravioleta” (radiação de corpo negro) por meio da explicação da <u>energia quantizada</u> . Aqui é considerado o nascimento a Física Quântica.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000); Singhl e Singh (2016)
1905	Albert Einstein formula uma <u>explicação para o efeito fotoelétrico</u> , propondo que a luz, interpretada na época como uma onda eletromagnética, poderia se comportar como <u>pacotes de energia quantizados</u> , chamados posteriormente de <u>fótons</u> .	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1911	Ernest Rutherford propõe o <u>modelo nuclear do átomo</u> .	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1913	Niels Bohr propõe o <u>modelo do átomo de órbitas discretas</u> , em conjunto com o conceito de <u>estados de energia estacionários</u> , que contribuíram para a explicação do <u>espectro do hidrogênio</u> .	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1914	James Franck e Custav Hertz confirmam a teoria dos estados de energia estacionários por meio da realização de um <u>experimento de espalhamento de elétrons</u> .	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1922	Gerlach realiza o experimento pensado por Stern em 1921, constatando a possibilidade de obtermos um sistema de dois níveis. Portanto, o <u>Experimento de Stern–Gerlach</u> foi o primeiro a constatar a existência de qubits (sistema de dois níveis) na Natureza.	Nielsen e Chuang (2011)

1923	Arthur Compton apresenta novos indícios do comportamento corpuscular da luz ao observar que os <u>raios-x se comportavam como partículas ao interagirem com elétrons.</u>	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1923	Louis de Broglie amplia a discussão da dualidade onda-partícula da luz ao sugerir que <u>partículas de matéria podem, também, se comportar como uma onda.</u>	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1924	Satyendra Nath Bose e Albert Einstein formulam que <u>átomos extremamente frios deveriam se condensar para um único estado quântico.</u>	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1925	Wolfgang Pauli formula o <u>princípio da exclusão</u> , afirmando que dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1925	Werner Heisenberg, Max Born e Pascual Jordan desenvolveram as <u>matrizes mecânicas</u> , consideradas a primeira formulação conceitualmente autônoma e logicamente consistente da mecânica quântica.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1926	Erwin Schroedinger desenvolve outra formulação conceitualmente autônoma e logicamente consistente da mecânica quântica: <u>ondas mecânicas</u> . Essa formulação teve como principal destaque a famosa <u>Equação de Schroedinger</u> .	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1926	Enrico Fermi e Paul Dirac introduzem uma nova forma de lidar com partículas por meio da <u>estatística de Fermi-Dirac</u> , que contribuiu para o surgimento da Física do Estado Sólido.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)

	E ainda, Paul Dirac fez outro marco para a Física Quântica com a publicação do seu artigo-seminário sobre a teoria quântica da luz, introduzindo uma nova abordagem aos problemas por meio da <u>estatística de Fermi-Dirac</u> .	
1927	Werner Heisenberg anuncia o seu <u>princípio da incerteza</u> , argumentando sobre a impossibilidade de conhecermos a posição e o momento linear das partículas de forma síncrona e exata devido aos efeitos de suas medidas.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1928	Paul Dirac apresenta uma <u>teoria relativística do elétron</u> , que abre discussão para a antimatéria.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1932	Carl David Anderson descobre a antimatéria, um antielétron chamado de pósitron.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1934	Hideki Yukawa propõe a possibilidade de medirmos as formas atômicas por meio dos <u>measos (partículas semelhantes aos prótons quando submetidas a um campo eletromagnético)</u> .	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1935	A. Einstein, N. Rosen e B. Podolsky argumentaram sobre a incompletude da equação de onda, demonstrando que devem existir “variáveis ocultas” para permitir uma descrição completa da realidade. Tal suposição ficou conhecida como <u>Paradoxo EPR</u> , sendo explicada posteriormente por meio do <u>emaranhamento quântico</u> .	Singhl e Singh (2016)
1948	Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga desenvolvem a <u>primeira teoria completa da interação entre os fótons e elétrons</u> (Eletrodinâmica Quântica).	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)

1957	John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer mostram que os <u>elétrons podem formar pares</u> por meio de propriedades quânticas sem resistência.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1959	Yakir Aharonov e David Bohm mostram que <u>o campo elétrico pode afetar partículas de tal forma que as suas propriedades não podem ser explicadas de forma clássica.</u>	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1964	John Bell propõe um teste experimental: <u>“Desigualdades de Bell”</u> . Tal teste permitiu a mais completa descrição de um sistema quântico ao considerar que as descrições anteriores sobre a localização realística de uma partícula eram incompatíveis com a teoria clássica.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000); Singhl e Singh (2016)
1970	James Park formula o <u>teorema da não-clonagem</u> .	Nielsen; Chuang (2011)
1970-80	São feitos progressos acerca dos modelos físicos do átomo e partículas subatômicas, descritos em termos de <u>quarks, léptons e das quatro forças fundamentais da natureza.</u>	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1973	Alexander Holevo mostra que <u>n qubits podem carregar mais informação do que n bits clássicos</u> , ainda que os bits clássicos possam ser mais acessíveis.	Nielsen; Chuang (2011)
1973	Charles H. Bennett mostra que a <u>Computação Quântica é reversível.</u>	Nielsen; Chuang (2011)
1975	RS Ingarden propõe que a teoria quântica deveria ser generalizada para a teoria geral da informação de	Singhl e Singh (2016)

	Shannon, corroborando para a <u>consolidação da Teoria Quântica da Informação</u> .	
1973	R. P. Poplavskii apresenta a <u>inviabilidade de computadores clássicos simularem sistemas quânticos</u> devido ao princípio da superposição.	Nielsen; Chuang (2011)
1980	Richard Feynman e Paul Benioff provêm uma <u>base teórica e modelo universal para a construção de um computador quântico</u> , que permite uma melhor descrição de sistemas quânticos se comparado aos computadores clássicos.	Singhl e Singh (2016)
1982	Paul Benioff desenvolve ainda mais seu modelo original de uma <u>máquina de Turing Quântica</u> .	Nielsen; Chuang (2011)
1982	Alain Aspect realiza um <u>experimento capaz de provar as Desigualdades de Bell</u> . Tal experimento consolidou ainda mais a Mecânica Quântica, permitindo validar mais os princípios de emaranhamento quântico e localidade.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)
1984	C. Bennett e G. Brassard <u>introduzem a discussão da criptografia quântica</u> , discutindo as leis da Mecânica Quântica sem o uso de técnicas matemáticas.	Singhl e Singh (2016)
1988	Yoshihisa Yamamoto and K. Igeta propõe a <u>primeira realização física de um computador quântico</u> , incluindo o portão CNOT de Feynman. Seu modelo usa átomos e fótons e é o progenitor da computação quântica moderna e protocolos de rede usando fótons.	Geta; Yamamoto (1998)
1991	Artur Ekert propõe um modelo de comunicação segura baseada em emaranhamento.	Ladvánszky (2019)

1992	David Deutsch e Richard Jozsa formulam o <u>Algoritmo de Deutsch-Jozsa</u> , salientando a eficiência de algoritmos quânticos em termos de complexidade de busca se comparado a algoritmos clássicos. Tal possibilidade é devida ao <u>paralelismo quântico</u> .	Nielsen e Chuang (2011)
1993	C.H. Barnett e outros apresentam a possibilidade de transmitir a informação quântica por meio de distâncias maiores a partir do <u>Teleporte Quântico</u> .	Singhl e Singh (2016); Nielsen e Chuang (2011)
1994	Peter Shor propõe um <u>Algoritmo Quântico de Logaritmos Discretos</u> e um <u>Algoritmo Quântico para a Fatoração de Números Inteiros</u> . Tais algoritmo podem facilmente quebrar métodos de Criptografia Assimétrica.	Singhl e Singh (2016); Vasileios Mavroeidis, Kamer Vishi, Mateusz D. Zych, Audun Jøsang (2018)
1994	Isaac Chuang e Yoshihisa Yamamoto propõem uma <u>realização óptica quântica de um computador quântico para implementar o algoritmo de Deutsch</u> . Com isso, eles introduzem a codificação dual-rail para qubits fotônicos.	Ladvánszky (2019)
1994	Ignacio Cirac e Peter Zoller propõem uma <u>realização experimental do portão NOT controlada com íons aprisionados</u> .	Ladvánszky (2019)
1995	Peter Shor e A.Steane desenvolvem códigos de Correção Quântica de Erros.	Singhl e Singh (2016)
1995	Eric Cornell, Carl Wieman e Wolfgang Ketterle <u>comprovaram a teoria de Bose-Einstein</u> acerca da condensação de átomos para um único estado em temperaturas muito baixas.	Daniel Kleppner e Roman Jackiw (2000)

1996	Lov Grover inventa <u>o algoritmo quântico de pesquisa de banco de dados</u> , que proporciona um aumento quadrático na velocidade de busca do oráculo. Tal algoritmo tem impacto direto na criptografia simétrica.	Vasileios Mavroeidis, Kamer Vishi, Mateusz D. Zych, Audun Jøsang (2018)
1996	DiVincenzo discute sobre os pré-requisitos para a construção de um computador quântico, conhecidos como Critério de DiVincenzo.	Singhl e Singh (2016)
1998	D. Tsui e A. Gossard e H. Stormer descobrem o <u>Efeito Hall Quântico Fracionário</u> , que permitem a visualização precisa de platôs quantizados em valores fracionários de e^2/h .	Singhl e Singh (2016)
1998	Daniel Gottesman e Emanuel Knill provam, de maneira independente, que uma certa subclasse de computações quânticas pode ser eficientemente emulada com recursos clássicos.	Nielsen; Chuang (2011)
1999	Yasunobu Nakamura e Jaw-Shen Tsai demonstram que um circuito supercondutor pode ser usado como um qubit.	Nielsen; Chuang (2011)
2001	IBM Almaden Research Center e Stanford University <u>implementam o Algoritmo de Shor</u> capaz de fatorar 15 números por meio de spins nucleares.	Singhl e Singh (2016)
2010	D-Wave introduz o <u>primeiro computador quântico</u> com um processador de 128 qubits, chamado de D-Wave One.	Singhl e Singh (2016)
2011	Zachary Dutton demonstra a <u>coexistência de fótons em supercondutores</u> .	Nielsen; Chuang (2011)

2012	Dall’Arno e outros implementam um sensor de leitura quântica inequívoca (sensor quântico).	Stefano Pirandola, Bhaskar Roy Bardhan, Tobias Gehring, Christian Weedbrook, and Seth Lloyd (2018)
2013	D-Wave lança o <u>D-Wave Two</u> com aproximadamente 512 qubits.	Singhl e Singh (2016)
2014	W. Pfaff e outros conseguem <u>demonstrar o Teleporte Quântico</u> de forma bem sucedida.	Singhl e Singh (2016)
2015	D-Wave anuncia o <u>D-Wave 2x</u> , com mais de 1000 qubits.	Singhl e Singh (2016)
2016	Google consegue <u>simular de forma bem sucedida a energia da molécula de gás hidrogênio (H2).</u>	Singhl e Singh (2016)
2016	IBM torna possível o uso de computadores quânticos em nuvem por meio do <u>IBM Experience</u> .	Singhl e Singh (2016)
2018	Google anuncia a criação de um chip quântico de 72 qubits, chamado "Bristlecone", alcançando um novo recorde.	Conover (2019)
2019	IBM revela seu primeiro computador quântico comercial, o <i>IBM Q System One</i> , projetado pelo <i>Map Project Office</i> e <i>Universal Design Studio</i> , com sede no Reino Unido, e fabricado pela Goppion.	Aron (2019)

2019	Equipe da Google publica um artigo alegando que o projeto atingiu a <u>supremacia quântica</u> .	Conover (2019)
-------------	---	----------------