

# Uma revisão sistemática da literatura sobre o ensino de Computação Quântica

A systematic literature review on the teaching of Quantum Computing

Vitória Luiza Fernandes Frare<sup>\*1</sup>, Ives Solano Araujo<sup>1</sup>, Eliane Angela Veit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em 14 de julho de 2024. Aceito em 02 de agosto de 2024.

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o ensino de Computação Quântica (CQ) de 2010 a 2023, com artigos indexados nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo*. Foram selecionados 50 artigos dos 283 inicialmente encontrados. Nosso estudo oferece um panorama dessas publicações, identificando a natureza dos trabalhos, o nível de ensino, o objetivo central, a metodologia utilizada, as justificativas para o ensino de CQ, as ferramentas e recursos empregados, os principais conteúdos ensinados e os resultados e recomendações. Dentre os resultados, destaca-se que a maioria dos estudos foca no nível de graduação e são propostas, com poucas pesquisas empíricas e relatos de experiência. Identificamos uma carência de referenciais teórico-metodológicos e uma lacuna na formação de professores, com apenas um estudo neste tema. A introdução da CQ é frequentemente feita através da programação quântica, aproveitando ferramentas para a construção de circuitos quânticos, valorizados pela indústria. Os desafios incluem falta de clareza nos objetivos educacionais e métodos de ensino. Recomendações incluem a integração de tópicos quânticos desde níveis introdutórios, continuidade na pesquisa, desenvolvimento de materiais educativos e parcerias com a indústria. O interesse no ensino de CQ é impulsionado pelo potencial de impacto das tecnologias quânticas na economia global.

**Palavras-chave:** Revisão da literatura, Computação Quântica, Ensino de Física.

This work presents a systematic review of the literature on the teaching of Quantum Computing (QC) from 2010 to 2023, with articles indexed in the *Scopus*, *Web of Science* and *Scielo* databases. 50 articles were selected from the 283 initially found. Our study offers an overview of these publications, identifying the nature of the work, the level of teaching, the central objective, the methodology used, the justifications for teaching QC, the tools and resources used, the main content taught and the results and recommendations. Among the results, it is highlighted that most studies focus on the undergraduate level and are proposals, with little empirical research and experience reports. We identified a lack of theoretical-methodological references and a gap in teacher training, with only one study on this topic. The introduction of QC is often done through quantum programming, utilizing tools for building quantum circuits, which are valued by the industry. The challenges include a lack of clarity in educational objectives and teaching methods. Recommendations include the integration of quantum topics from introductory levels, continuity in research, development of educational materials, and partnerships with the industry. Interest in teaching QC is driven by the potential impact of quantum technologies on the global economy.

**Keywords:** Literature Review, Quantum Computing, Physics Education.

## 1. Introdução

Imagine poder solucionar, em questão de minutos, problemas complexos que atualmente levariam anos para serem resolvidos computacionalmente. Pois as bases para essa possibilidade já existem há quase meio século: foram lançadas por Richard Feynman, em 1982, durante a Primeira Conferência de Computação Física no renomado Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), quando propôs o primeiro simulador quântico. Essa ideia marcou o início do que viria a ser conhecido como o computador quântico universal, um dispositivo capaz de operar conforme as leis da Mecânica Quântica [1].

Ao enfatizar a capacidade da Computação Quântica (CQ) para resolver problemas que por meio da computação clássica demandariam períodos de execução milhões de vezes maior, Feynman deu o pontapé inicial para a chamada segunda revolução quântica. Entretanto, foi somente com o trabalho de Shor, em 1994, que a CQ deixou de ser apenas uma especulação acadêmica. Shor [2] apresenta e discute algoritmos quânticos polinomiais, com foco nos logaritmos discretos e na fatoração de números inteiros. Esses são dois problemas fundamentais para a criptografia e segurança da informação, para os quais não se conhece soluções eficientes com a computação clássica, apesar dos esforços empreendidos.

A partir daí, houve um aumento significativo na pesquisa dedicada ao desenvolvimento de algoritmos

\*Endereço de correspondência: [vitoria.frare@gmail.com](mailto:vitoria.frare@gmail.com)

quânticos e computadores quânticos, inaugurando uma nova era da tecnologia e ciência, e o surgimento da área de pesquisa e desenvolvimento, a Tecnologia da Ciência da Informação Quântica (*Quantum Information Science Technology – QIST*). Como dizem Dowlink e Milburn [3], enquanto na primeira revolução quântica a Mecânica Quântica é usada para entender aquilo que já existe, na segunda, é empregada para “alterar a face quântica do nosso mundo físico” [3, p. 2, tradução nossa].

A Computação Quântica tem sido aplicada em diversas áreas, demonstrando potencial para transformar o modo como lidamos com problemas complexos. Uma das áreas em destaque é a indústria financeira, na qual algoritmos quânticos têm sido utilizados para resolver problemas diversos como precificação de derivativos [4], análise de risco de crédito [4, 5] e outros problemas financeiros [6, 7]. Na medicina e na indústria farmacêutica, a aplicação da CQ para a descoberta de novos medicamentos [8–10] pode resultar em avanços na prevenção e tratamento de doenças. Além disso, a área de segurança da informação tem se interessado pelas potencialidades da CQ para o desenvolvimento da criptografia e distribuição de chaves quânticas, pois torna possível estabelecer canais de comunicação seguros, onde a troca de informações é protegida contra interceptações e ataques de espões [11–13].

Dado o seu imenso potencial, uma corrida global em direção à liderança quântica tem se desdobrado, especialmente, pelo interesse no crescimento econômico e na segurança nacional. Nesse contexto, surgem iniciativas governamentais ao redor do mundo. Nos Estados Unidos, por exemplo, foi criada em 2018 pelo governo federal a *National Quantum Initiative (NQI)* [14] para acelerar a pesquisa e o desenvolvimento quântico do país. Esse programa promove parcerias entre universidades, indústrias e laboratórios nacionais, com o intuito de criar redes de desenvolvimento na área de *QIST*. Na Europa, após a publicação do manifesto quântico que visava colocar o continente na vanguarda da corrida quântica, foi lançado o projeto *Quantum Flagship* [15]. Essa iniciativa de investigação e inovação a longo prazo tem como objetivo colocar a Europa na liderança da segunda revolução quântica ao apoiar pesquisas com aplicações comerciais que explorem plenamente o potencial quântico. Já a China, a partir do lançamento do satélite de ciência quântica *Micius*, em 2016, tem-se destacado na condução de experimentos: “QKD [*Quantum Key Distribution – distribuição de chave quântica*] de satélite para solo, teste de não-localidade quântica baseada em satélite e teste de teletransporte quântico de solo para satélite” [16, p. 2, tradução nossa].

Sob o ponto de vista de Física, a Computação Quântica se fundamenta nos princípios da Mecânica Quântica e pesquisas educacionais sobre ensino e aprendizagem de Física Quântica (FQ) têm sido conduzidas há décadas em diversos países do mundo. É marcante que o Brasil ocupa o segundo lugar entre os países que mais publicam

nesta área, conforme análise bibliométrica de Bitzenbauer [16], contemplando 1.520 estudos publicados entre o período de 2000 e 2021. Bitzenbauer observa que, ao longo do período analisado, houve uma mudança no foco das pesquisas, passando de trabalhos mais específicos de reconstrução de conteúdo para o ensino de Física Quântica, para estudos empíricos sobre ensino e aprendizagem. Porém, apesar do crescimento do número anual de publicações, passando de 31 em 2000 para 118 em 2020, os autores ressaltam a necessidade de mais pesquisas empíricas sobre ensino e aprendizagem de FQ. Também recente e com foco em estudos empíricos, a revisão da literatura de Souza *et al.* [17] se concentra em pesquisas realizadas em cursos de graduação publicados entre o ano de 2000 e 2018. Dentre seus resultados é possível destacar que: i) a maioria dos artigos se refere a bibliografias de consulta para professores; ii) há escassez de trabalhos voltados para a formação inicial e continuada de professores; iii) a maior parte dos estudos se concentra na antiga Mecânica Quântica e iv) há carência de tópicos importantes, como superposição, estados quânticos e observáveis, emaranhamento quântico e criptografia quântica. Apenas um artigo do corpus analisado menciona a CQ como conteúdo [18]. Outros importantes resultados serão retomados ao longo deste artigo.

Existem diversas outras revisões da literatura sobre estudos relativos ao ensino de Física Moderna e Contemporânea e, especificamente, de Mecânica Quântica (MQ). Esses trabalhos nos permitem conhecer, por exemplo, concepções alternativas [19–21] e dificuldades de aprendizagem [22, 23]. Dentre essas, merece destaque a revisão de Krijtenburg-Lewerissa *et al.* [23], que contempla pesquisa no ensino de MQ em nível médio e na graduação entre os anos de 1997 e 2017. Krijtenburg-Lewerissa *et al.* [23] destacam dificuldades dos alunos em articular o comportamento ondulatório e corpuscular, compreender o princípio da incerteza, tunelamento, natureza probabilística, estados quânticos, superposição e evolução temporal. No que diz respeito às estratégias de ensino, identificam que os principais focos estão nas interpretações da MQ, nos modelos e analogias clássicas e na abordagem não matemática e conceitual. Quanto aos recursos de ensino, destacam-se ferramentas como o PhET (*Physics Education Technology*), os QuILT’s (*Quantum Interactive Learning Tutorials*), as simulações do projeto QuVis (*The Quantum Mechanics Visualization Project*) e jogos quânticos.

Já em relação ao Ensino de Computação Quântica, apesar da relevância atual, não localizamos uma revisão sistemática da literatura, justificando o presente trabalho. A revisão aqui apresentada compreende o período de 2010 a 2023 e tem por objetivo obter uma visão abrangente das publicações nacionais e internacionais relacionadas ao ensino da Computação Quântica. Para alcançá-lo, buscamos respostas às seguintes questões de pesquisa sobre o ensino de computação quântica:

1. *Qual o perfil da produção acadêmica?*
  - a. *Natureza dos trabalhos*
  - b. *Nível de ensino*
  - c. *Objetivo central*
  - d. *Metodologia de Pesquisa e Ensino*
2. *Quais as justificativas e motivações apresentadas nos trabalhos?*
3. *Quais as ferramentas e recursos utilizados?*
4. *Quais conteúdos têm sido propostos?*
5. *Quais os principais resultados e recomendações dos artigos de pesquisa?*

Nas seções seguintes, delineamos a metodologia utilizada na busca e seleção dos artigos (Seção 2); fornecemos respostas para cada uma das questões de pesquisa (Seção 3); e apresentamos as conclusões decorrentes da análise da produção mapeada (Seção 4).

## 2. Metodologia

Para a realização desta revisão sistemática, adotamos as orientações de Siddaway, Wood e Hedges [24]. Em particular, focamos nas seguintes orientações: formulação de questões de pesquisa claras, específicas, respondíveis e suficientemente amplas; definição de termos de busca inequívocos que abarque todos os trabalhos relevantes; explicitação e justificação de critérios de inclusão e exclusão; criação de sistemas claros de manutenção de registros; condução do processo de busca e seleção de literatura realizado por dois revisores independentes que devem concordar em cada etapa da revisão; e busca em pelo menos duas bases eletrônicas diferentes. Já a análise dos dados qualitativos foi feita com as orientações de Creswell [25], conforme exposto na sequência.

O levantamento bibliográfico compreendeu o período de 2010, ano que antecede o surgimento do primeiro computador quântico, e outubro de 2023, data em que teve início este trabalho. Na sequência, descrevemos as etapas de busca, leitura preliminar e leitura integral.

### 1ª Etapa – Busca dos artigos

Com o intuito de criar um panorama geral sobre a produção na área do ensino de CQ, estabelecemos como termos de busca nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo* os seguintes descritores: “*quantum comput\**” OR “*quantum information*” AND “*education*” OR “*student\**” OR “*science education*” OR “*teaching*”. Adicionalmente na base *Scielo*, os mesmos descritores foram usados também em português. Para delimitar o escopo da pesquisa, adotamos os seguintes critérios de inclusão: ser sobre computação quântica e/ou informação quântica; pertencer à área de Educação ou Ensino; ter sido publicado entre 2010 e outubro de 2023; serem documentos do tipo artigos revisados pelos pares; e estarem em inglês, espanhol ou português. Dessa forma, os resultados da busca revelaram 134 artigos na base *Scopus*, 101 na *Web*

*of Science* e um total de 48 artigos na *Scielo*, totalizando 283 artigos identificados.

### 2ª Etapa – Leitura preliminar

Nesta etapa, realizamos a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos 283 artigos. Para manter o escopo da pesquisa, com os seguintes critérios de exclusão eliminamos: duplicados ( $n = 80$ ); exclusivamente relacionados à Física experimental ou Teórica ( $n = 73$ ); foco no ensino de tópicos distintos, como mecânica quântica e química quântica ( $n = 18$ ); exploração de outras áreas, como direito digital, psicologia, saúde e economia ( $n = 29$ ); divulgação sobre descobertas, teorias ou avanços científicos, informações sobre publicações em eventos, e áreas promissoras de pesquisa ( $n = 23$ ). Assim, ficamos com 60 artigos para a leitura integral<sup>1</sup>.

### 3ª Etapa – Leitura integral

No processo de leitura integral dos 60 artigos, outros dez foram eliminados devido à reaplicação dos critérios de exclusão, conforme detalhado na Figura 1. Nessa figura é apresentado o fluxograma PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que sintetiza o procedimento de busca e seleção dos artigos nas bases de dados. Ao final, ficamos com um total de 50 artigos incluídos.

O processo de análise e categorização envolveu a seleção de trechos relevantes do corpus em análise para responder a cada uma das questões de pesquisa, o agrupamento desses trechos segundo categorias emergentes da análise, e a descrição dessas categorias [25].

Para a classificação da metodologia de pesquisa em quantitativa, qualitativa ou mista, consideramos as principais características apresentadas por Creswell [25]. Assim, a pesquisa quantitativa busca responder a questões de pesquisa por meio da identificação de tendências ou da explicação da relação entre variáveis, coletando dados numéricos com instrumentos padronizados e analisando-os estatisticamente. Já a pesquisa qualitativa objetiva explorar o problema e desenvolver um entendimento profundo do fenômeno, coletando informações descritivas e detalhadas por meio de entrevistas, observações e análise de documentos, com a interpretação dos resultados sendo um processo reflexivo e interpretativo. A pesquisa mista combina elementos das metodologias quantitativa e qualitativa em um mesmo estudo.

## 3. Resultados e Discussões

Nesta seção apresentamos resultados da análise dos 50 artigos selecionados, de acordo com as questões de pesquisa.

<sup>1</sup> Uma tabela contendo a referência e várias outras informações dos 203 artigos não duplicados identificados na busca podem ser encontrada em Frare, Araujo e Veit [26]. Em particular, explicita-se o motivo da exclusão nas etapas 2 e 3.

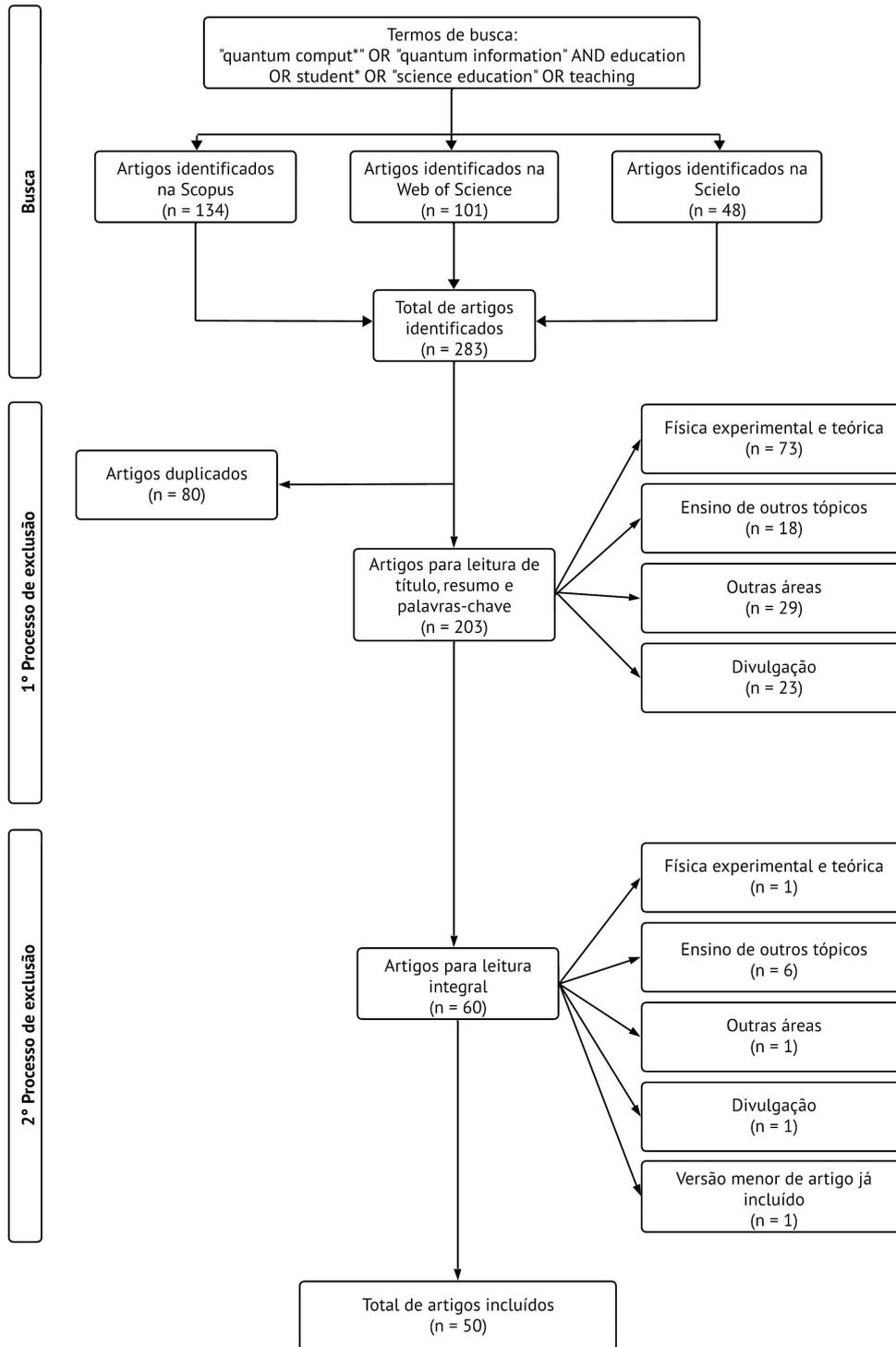


Figura 1: Processo de busca e seleção dos artigos.

**3.1. Qual é o perfil da produção acadêmica acerca do ensino de computação quântica?**

Classificamos os artigos em relação à *natureza* (Pesquisa Empírica, Proposta, Relato de Experiência ou Discussão Teórica), ao *nível de ensino* (Ensino Médio, Graduação, Pós-Graduação ou Graduação e Pós-Graduação), ao *objetivo central* (Fundamentos Teóricos e Práticos de

Computação Quântica ou Mapeamentos) e a *metodologia de pesquisa e/ou ensino*.

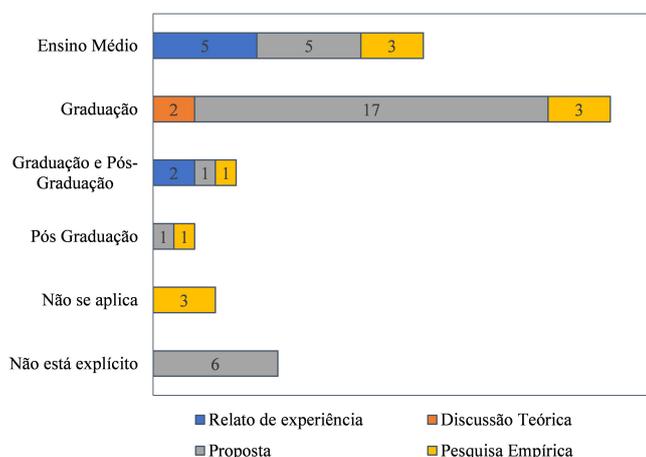
**Com relação à natureza dos trabalhos**, foram agrupados em:

- i) *pesquisa empírica*: possuem questões de pesquisa ou objetivos bem definidos, metodologia de

- pesquisa, análise e resultados baseados em dados empíricos;
- ii) *proposta*: apresentam propostas pedagógicas que visam introduzir temas ou tópicos específicos em sala de aula; ou propostas curriculares que delinham orientações para o desenvolvimento do currículo em uma instituição educacional ou discutem, avaliam e debatem diferentes elementos de um currículo existente;
  - iii) *relato de experiência*: descrevem os resultados de uma experiência educacional, sem o rigor teórico e metodológico de uma pesquisa;
  - iv) *discussão teórica*: buscam explorar e discutir conceitos, ideias e implicações teóricas de importantes tópicos de computação quântica, como emaranhamento e não-localidade, com o objetivo de fornecer insights sobre uma abordagem didática.

Como pode ser observado na Figura 2, a maioria dos artigos analisados se refere a propostas, sejam elas pedagógicas [27–52] ou curriculares [53–56]; há ausência de artigos de pesquisa teórica e poucos são os de pesquisa empírica [57–67]; relatos de experiência [68–74] e discussões teóricas [75, 76] também ocorrem em pequeno número.

Em relação ao ensino de Mecânica Quântica, Krijtenburg-Lewerissa *et al.* [23], em 2017, apontaram a necessidade de mais pesquisas empíricas. Em 2021, essa carência ainda era evidente, pois Souza *et al.* [17] examinaram 95 artigos e apenas nove deles foram identificados como trabalhos empíricos, especificamente dentro do contexto de um componente curricular de MQ. Os 85 artigos restantes, abordavam propostas didáticas, relatos de experiências, e um artigo concentrava-se exclusivamente na preparação de material didático, sem intervenção em sala de aula. Bitzenbauer [16] também concluiu que o foco inicial esteve em trabalhos relacionados aos conteúdos e só posteriormente passou a ter resultados empíricos sobre o ensino e aprendizagem. No ensino



**Figura 2:** Distribuição dos artigos quanto ao nível de ensino e natureza.

de computação quântica, nossa revisão mostra rumo semelhante, pois o foco ainda está em propostas, com escassez de estudos empíricos e relatos de experiência.

**Com relação ao nível de ensino**, classificamos os trabalhos em: *Ensino Médio*, *Graduação*, *Pós-Graduação*, *Graduação e Pós-Graduação*, *Não está explícito* ou *Não se aplica*. A categoria “Não está explícito” contém artigos em que não fica claro o nível de ensino para o qual são destinados. Já os trabalhos que não se enquadram em um nível de ensino específico foram classificados em “Não se aplica”. Optamos por só identificar ao longo deste texto os artigos associados às categorias relevantes; artigos das categorias “Não está explícito” ou “Não se aplica” são identificados somente na planilha que contém a relação dos 50 artigos, com várias de suas características, disponível em [26].

A Figura 2 mostra como essas categorias se relacionam com a natureza das publicações.

O nível de ensino de Graduação é o alvo da maior parte dos trabalhos, refletindo o grande interesse na formação de profissionais qualificados, a fim de apoiar o avanço da indústria quântica. Dentre esses, 15 são propostas pedagógicas [27, 28, 31, 32, 34, 36–39, 41–43, 48, 49, 52] e dois são propostas curriculares [54, 55], três são pesquisas empíricas [57, 62, 66] e dois são discussões teóricas [75, 76]. Os cursos de graduação contemplados nesses trabalhos podem ser divididos em três grupos principais: Física ( $n = 9$ ), Engenharias ( $n = 9$ ) e Ciência da Computação ( $n = 2$ )<sup>2</sup>. Importante notar que essas categorias não são exclusivas, pois alguns trabalhos estão associados a mais de um curso de graduação. Isso ocorre devido à tendência de cursos localizados em departamentos de Física expandirem seus currículos adicionando disciplinas em Engenharia e Ciência da Computação [53]. Em relação aos cursos de Física, não há especificação quanto à distinção entre licenciatura e bacharelado nos artigos analisados. Isso nos preocupa, pois compreendemos que os conhecimentos nessa área recomendados para um bacharel em Física não coincidem com os desejáveis para a formação de professores.

Como veremos em resposta à questão sobre os resultados e recomendações dos artigos de pesquisa, as indústrias quânticas estão em busca de engenheiros, físicos e cientistas da computação em níveis de graduação, mestrado e doutorado. Nesse sentido, a colaboração entre as instituições acadêmicas e a indústria cria um ambiente propício para o desenvolvimento de programas educacionais direcionados às áreas de formação demandadas.

O nível de Ensino Médio abrange a segunda maior quantidade de trabalhos. É interessante notar que do total de sete relatos de experiência contidos nos 50 artigos em discussão, cinco sejam voltados para o ensino médio [68–72]. Ademais, há quatro propostas

<sup>2</sup> Não foram classificados nesses grupos sete artigos, pois não está explícito no texto ou não se aplica.

pedagógicas [29, 33, 46, 51], uma curricular [56] e três pesquisas empíricas [63, 65, 67]. Os trabalhos direcionados ao ensino médio surgem como resposta à crescente relevância da CQ no cenário tecnológico. Um dos argumentos para a sua inserção nesse nível se baseia na possibilidade de abordar fenômenos quânticos de maneira interdisciplinar, uma vez que se fundamenta nos princípios da Física, Matemática e Ciência da Computação, o que pode motivar os estudantes a seguir sua formação no campo da Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática, denominado de *STEM* (acrônimo da expressão inglesa *Science, Technology, Engineering and Mathematics*) [37, 65, 70, 77, 78].

No âmbito da Pós-graduação, apenas dois trabalhos se focam somente nesse nível: uma pesquisa empírica [58] e uma proposta curricular [53]. Outros trabalhos abrangem tanto a Graduação quanto a Pós-Graduação: dois relatos de experiência [73, 74], uma pesquisa empírica [64] e uma proposta pedagógica [40]. Embora o número de publicações sobre o ensino em nível de pós-graduação não seja elevado, esses estudos refletem uma resposta à demanda de profissionais especializados em computação quântica. Conforme destacado por Hughes *et al.* [61], a indústria valoriza os diplomas de mestrado e doutorado nessa área, pois entendem que na pós-graduação os alunos têm a oportunidade de se aprofundar em habilidades específicas.

**O objetivo central foi classificado** em duas grandes categorias emergentes da análise: i) Fundamentos Teóricos e Práticos de Computação Quântica e ii) Mapeamentos.

- i) *Fundamentos Teóricos e Práticos de CQ* abrange trabalhos que investigam e promovem o ensino da computação quântica em diferentes contextos educacionais, combinando conceitos de física quântica, ciência da computação e teoria da informação quântica. Essa categoria, engloba as seguintes subcategorias:
  - a) *Introdução à Programação Quântica* inclui artigos que introduzem princípios da programação quântica, ensinando como escrever e executar programas em computadores quânticos ou simuladores. Os trabalhos podem incluir tutoriais passo a passo, exemplos práticos, explicações sobre a sintaxe das linguagens de programação e demonstrações de como realizar operações e cálculos em um ambiente quântico. Como exemplo, podemos citar a pesquisa de Salehi, Seskir e Tepe [65] que apresenta uma abordagem que utiliza a programação quântica como ferramenta para introduzir conceitos de computação quântica a alunos de graduação da área *STEM*;
  - b) *Introdução Conceitual à Computação Quântica* é composta por artigos que têm como foco principal a apresentação e explicação

dos conceitos fundamentais da computação quântica. Podem incluir atividades práticas, simulações, jogos ou experimentos que auxiliam os estudantes na visualização e compreensão dos princípios subjacentes à computação quântica. Como exemplo, podemos citar o artigo de Kopf *et al.* [40] que apresenta uma proposta para trabalhar conceitos como superposição, interferência e emaranhamento, por meio de um jogo de cartas;

- c) *Outros Objetivos* contempla artigos que possuem objetivos centrais heterogêneos, como: educação orientada para o futuro, introdução à criptografia quântica, introdução à óptica quântica, introdução às tecnologias emergentes e introdução à Teoria da Informação Quântica. Por exemplo, a pesquisa realizada por Kohnle e Rizzoli [62] está centrada numa introdução à criptografia quântica, pois avalia a eficácia de simulações interativas desenvolvidas para auxiliar no ensino e aprendizado da Distribuição Quântica de Chaves em cursos de Mecânica Quântica.
- ii) *Mapeamentos* abrange trabalhos que estão preocupados em mapear programas educacionais, currículos e abordagens de ensino, ou que investigam as habilidades, formações e competências úteis para a mão de obra na indústria quântica. No geral, os artigos enquadrados nesse objetivo geral constituem uma resposta às iniciativas governamentais, como a *National Quantum Initiative* nos Estados Unidos [14] e o *Quantum Flagship* na Europa [15]. Essa categoria engloba as seguintes subcategorias:
  - a) *Ensino de QIS (Quantum Information Science)* contempla trabalhos sobre o ensino de Ciência da Informação Quântica, como o artigo de Aiello *et al.* [17] que analisa programas de pós-graduação em *QIS* nos EUA e na Europa, e o artigo de Meyer *et al.* [64] que se concentra em investigar as práticas de ensino e as perspectivas dos instrutores de *QIS* em cursos introdutórios. Além disso, incluímos nessa subcategoria um mapeamento da implementação do experimento de fóton único em laboratórios de graduação [57];
  - b) *Demandas da Indústria Quântica (IQ)*<sup>3</sup> contempla artigos que se dedicam a investigar e compreender as demandas específicas da indústria quântica em termos de habilidades, conhecimentos e competências necessárias para os profissionais que desejam ingressar nessa área [59–61].

<sup>3</sup> Por indústria quântica entende-se “todas as empresas envolvidas em atividades que aplicam a ciência da informação quântica para o funcionamento de seus produtos ou fornecem tecnologia que possibilita tal produto.” [6, p. 020131-1].

**Tabela 1:** Classificação dos artigos quanto à natureza e objetivo central.

Objetivo Central	Natureza do Trabalho	Artigos
<b>Fundamentos Teóricos e Práticos da Computação Quântica</b> ( <i>n</i> = 36)	Introdução à Programação Quântica ( <i>n</i> = 16)	Pesquisa Empírica ( <i>n</i> = 1) Proposta ( <i>n</i> = 15) Salehi, Seskir e Tepe, 2022 [66]. Alves <i>et al.</i> , 2020 [27]; Alves e Felipe, 2022 [28]; Brody e Guzman, 2021 [30]; Candela, 2015 [31]; Carrascal, del Barrio e Botella, 2021 [32]; de Jesus <i>et al.</i> , 2021 [34]; Genç, Aydın e Erdal, 2022 [36]; José, Piqueira e Lopes, 2013 [38]; Kain, 2021 [39]; Moran, 2018 [44]; Zaman, Morrell Jr e Wong, 2023 [45]; Oliveira <i>et al.</i> , 2022 [47]; Rabelo e Costa, 2018 [48]; Ross, 2020 [49]; Santos, 2017 [50].
	Introdução Conceitual à Computação Quântica ( <i>n</i> = 20)	Pesquisa Empírica ( <i>n</i> = 3) Proposta ( <i>n</i> = 13) Bungum e Selstø, 2022 [58]; Magnussen <i>et al.</i> , 2014 [63]; Satanassi, Ercolessi e Levrini, 2022 [67]. Bitzenbauer e Zenger, 2022 [29]; Coecke <i>et al.</i> , 2022 [33]; Dzurak <i>et al.</i> , 2022 [54]; Garcia e Bajwa, 2016 [55]; Grosman, Braga e Huguenin, 2019 [35]; How, 2022 [37]; Kopf <i>et al.</i> , 2023 [40]; López-Incera, Hartmann e Dür, 2020 [42]; Migdał <i>et al.</i> , 2022 [43]; Nita <i>et al.</i> , 2023 [43]; Singh, Levy e Levy, 2022 [56]; Sutrin <i>et al.</i> , 2023 [51]; Vianna, Barros e Hor-Meyll, 2018 [52].
	Outros Objetivos ( <i>n</i> = 8)	Relato de Experiência ( <i>n</i> = 4) Pesquisa Empírica ( <i>n</i> = 2) Proposta ( <i>n</i> = 1) Relato de Experiência ( <i>n</i> = 3) Discussão Teórica ( <i>n</i> = 2) Angara <i>et al.</i> , 2022 [71]; Hughes <i>et al.</i> , 2020 [72]; Marckwordt <i>et al.</i> , 2021 [68]; Satanassi, 2020 [70]. Kohnle e Rizzoli, 2017 [62]; Rasa, Palmgren e Laherto, 2022 [65]. Lethen, 2022 [41]. Fowler <i>et al.</i> , 2019 [73]; Lukishova, 2022 [74]; Walsh <i>et al.</i> , 2022 [69]. Batle, Abutalib e Abdalla, 2017 [75]; Schroeder, 2017 [76].
	Ensino de QIS ( <i>n</i> = 3)	Pesquisa Empírica ( <i>n</i> = 2) Proposta ( <i>n</i> = 1) Borish e Lewandowski, 2023 [57]; Meyer <i>et al.</i> , 2022 [64]. Aiello <i>et al.</i> , 2021 [53].
<b>Mapeamentos</b> ( <i>n</i> = 6)	Demandas da IQ ( <i>n</i> = 3)	Pesquisa Empírica ( <i>n</i> = 3) Fox, Zwickl e Lewandowski, 2020 [59]; Hasanovic <i>et al.</i> , 2022 [60]; Hughes <i>et al.</i> , 2022 [61].

A Tabela 1 mostra a distribuição dos artigos quanto ao objetivo central e natureza do trabalho. Como já mencionado, outras características desses artigos podem ser encontradas em Autores [26].

**Com relação à metodologia** esclarecemos que a metodologia de pesquisa envolve um conjunto de diretrizes que conectam os paradigmas teóricos às estratégias de investigação, bem como aos métodos para a coleta e análise das informações. Por outro lado, a metodologia de ensino abrange as teorias de aprendizagem, estratégias de ensino, concepções epistemológicas e ferramentas e recursos utilizados. Porque entendemos ser importante investigar quais as ferramentas e recursos mais adotados, temos uma questão específica sobre esse assunto, a Questão 3, e deixamos para analisar esse aspecto da metodologia de ensino na subseção 3.3. Para identificar o perfil das metodologias presentes nos artigos, descrevemo-las de acordo com a natureza dos trabalhos.

**Artigos de pesquisa** – os 11 trabalhos desta categoria, segundo nossa classificação, adotam metodologia

qualitativa [65], quantitativa [61, 62, 66] ou mista [57–60, 63, 64, 67].

Os instrumentos de coleta identificados nesta revisão abrangem questionários [57, 58, 60–64, 67], entrevistas semiestruturadas ou abertas [57–59, 63–65] e pré e pós-teste [62, 66]. As metodologias empregadas para a análise de dados incluem análise temática [58, 65] e a análise fenomenográfica [65]. Entretanto, é pouco frequente a explicitação dos referenciais adotados na análise qualitativa.

Seis dos artigos de pesquisa empírica se referem à implementação de algum tópico em sala de aula: implementações práticas envolvendo simulações [58, 62], construção de circuitos e algoritmos por meio da programação quântica [58, 66], instrução direta [65, 67] e perspectiva histórica [65, 67], estratégias de gamificação [63] e pensamento sistêmico e técnicas de construção de cenários [65].

**Artigos de propostas e relatos de experiência** – nos 37 trabalhos dessas naturezas temos um conjunto de abordagens pedagógicas: construção de circuitos e

algoritmos por meio da programação quântica [30–32, 36, 39, 41, 44, 45, 48, 50, 54, 71, 72], implementações práticas envolvendo simulações [31, 36, 43, 54, 69, 70], exploração da analogia clássica e quântica [35, 51, 52, 56, 70], estratégias de gamificação [40, 42, 68, 71], representações visuais [33, 46, 55], perspectiva histórica [29, 70], instrução direta [71, 72] e exploração do formalismo matemático da computação quântica [37].

A programação quântica se destaca (13 em 37) porque permite uma implementação prática, em que os estudantes podem fazer experimentos com operações quânticas e observar seus resultados. Além do seu aspecto motivador, tem potencial para promover uma compreensão aprofundada dos fenômenos quânticos que embasam a CQ. Adicionalmente, essa abordagem se alinha com a tendência mais ampla de integração do pensamento computacional em vários domínios educacionais [79–81]. Ao incorporar a programação, os alunos não apenas podem aprender sobre os princípios quânticos, mas também podem desenvolver habilidades associadas à alfabetização computacional e à resolução de problemas, que são valiosas em um mundo cada vez mais tecnológico.

Também se observa certa preocupação em adotar uma abordagem que leve em conta a analogia entre conceitos clássicos e quânticos. Esta abordagem já é bem fundamentada na área de ensino de MQ, onde a óptica ondulatória é frequentemente utilizada como porta de entrada ao mundo quântico [82–85].

Em relação aos referenciais metodológicos e teóricos para o ensino, entre os 50 trabalhos analisados, 27 não explicitam os referenciais adotados e em oito trabalhos essa categorização não se aplica, pois tratam-se de mapeamentos ou discussões teóricas. Dessa forma, apenas 15 trabalhos apresentam algum referencial para o ensino, apresentados de forma superficial. Não foi possível categorizá-los devido à falta de padrão entre eles.

### ***Síntese da resposta à primeira questão de pesquisa***

Em relação à natureza dos 50 trabalhos incluídos, a maior parte ( $n = 30$ ) se constitui em propostas curriculares ou pedagógicas, o que se alinha aos achados na área de ensino de Mecânica Quântica, na qual predominam as propostas de ensino e há escassez de estudos empíricos que investigam o ensino e/ou a aprendizagem [16, 17, 23, 86]. Os trabalhos incluídos se concentram na graduação ( $n = 22$ ), direcionados principalmente aos cursos de Física e Engenharia, refletindo a demanda crescente, tanto de iniciativas governamentais quanto privadas, por profissionais qualificados capazes de contribuir para o progresso da segunda revolução quântica.

Quanto ao objetivo central, 36 artigos se concentram em *Fundamentos Teóricos e Práticos de Computação Quântica*, 16 deles com ênfase na *Introdução à Programação Quântica*, abordando conceitos fundamentais por meio da programação em nuvem; e 20 focam em

uma *Introdução Conceitual à Computação Quântica*, explorando os conceitos de forma diversificada, incluindo simulações, jogos e outras atividades práticas. Os *Mapeamentos do Ensino de QIS (n = 3)* e de *Demandas da Indústria Quântica (n = 3)* constituem uma resposta às iniciativas governamentais que visam expandir o número de pesquisadores, educadores e estudantes com formação em QIS, além de desenvolver mão de obra especializada e promover oportunidades de currículos e pesquisas multidisciplinares.

Predominam as metodologias mistas e como instrumentos de coleta de dados, questionários e entrevistas. Já em relação à metodologia de ensino, há indicação de estratégias e materiais utilizados, sem, entretanto, explicitação de referenciais teórico-metodológicos. São diversificadas as estratégias de ensino, incluindo programação quântica, simulações, analogias clássicas e quânticas, jogos e gamificação. As ferramentas e recursos utilizados para viabilizar essas estratégias constituem a resposta à terceira questão de pesquisa.

### **3.2. Quais são as justificativas e motivações apresentadas nos trabalhos sobre o ensino de computação quântica?**

Para responder a essa questão, conforme as orientações de Creswell [27], selecionamos os trechos relevantes associados a justificativas e motivações, agrupamos trechos similares e os classificamos nas seguintes categorias emergentes da análise dos 50 artigos: *Avanço Tecnológico*, *Formação Especializada*, *Aprendizagem de Física e Outras*<sup>4</sup>. As categorias não são exclusivas, pois alguns trabalhos apresentam mais de uma justificativa ou motivação, com igual ênfase.

*Avanço tecnológico* é a justificativa empregada em 25 artigos que defendem o progresso na computação quântica, visando o crescimento econômico e segurança nacional, pois as tecnologias quânticas têm potencial para revolucionar diversos setores, inaugurando uma nova era de inovação e desenvolvimento [87]. Por exemplo, Genç, Aydin e Erdal [36] argumentam que a computação quântica está se espalhando por diversas áreas, desde aprendizado de máquina até genética, e afirmam que “estamos prestes a experimentar um efeito com computadores quânticos semelhante à programação de computadores clássicos numa fase inicial” [36, p. 1, trad. nossa]. Nita *et al.* [46] alertam que as tecnologias quânticas terão um grande impacto nas finanças, segurança nacional, energia e telecomunicações, mas que “o modo como essas tecnologias funcionam é atualmente compreendido apenas por um pequeno segmento da população” [46, p. 2, trad. nossa].

Na categoria de *formação especializada*, incluem-se 24 trabalhos cuja justificativa para o ensino de CQ reside na urgência em atender à demanda por uma força

<sup>4</sup> A classificação dos 50 artigos quanto à justificativa e motivação estão disponíveis em [26].

de trabalho capacitada em computação quântica. Por exemplo, Satanassi, Ercolessi e Levrini [67] defendem que é necessário expandir a força de trabalho quântica “para envolver e preparar as próximas gerações de especialistas em tecnologias quântica” [66, p. 1, trad. nossa]. Zaman, Morrel e Wong [45] destacam que a CQ teve um grande avanço nas últimas duas décadas, no entanto a supremacia quântica<sup>5</sup> ainda não foi alcançada, assim “a formação de uma força de trabalho em tecnologia quântica é uma meta iminente para muitos países, a fim de apoiar esta indústria em rápido crescimento” [45, p. 1, trad. nossa].

Na categoria *Aprendizagem de Física*, inserem-se 13 trabalhos cujos autores consideram que o ensino de CQ possibilita uma compreensão mais sólida e intuitiva dos fundamentos da mecânica quântica e da própria natureza da ciência, pois os alunos podem compreender os efeitos de superposição, interferência e emaranhamento, por meio de algoritmos e circuitos quânticos. Por exemplo, López-Incera, Hartmann e Dür [42] apontam que o ensino de criptografia quântica destaca “a natureza intrigante e contraintuitiva do nosso mundo e contribui para o tema geral do ensino sobre a natureza da ciência” [42, p. 2, trad. nossa]. De modo semelhante, Kohnle e Rizzoli [62] pontuam que aspectos de mecânica quântica podem ser abordados muito mais cedo, por meio de tópicos da informação quântica, como a distribuição de chaves quânticas, pois requer apenas conhecimento de conceitos básicos de MQ, como superposição, probabilidades de resultados, observáveis incompatíveis e colapso do estado quântico.

Por fim, temos quatro trabalhos categorizados como *Outras*, os quais apresentam justificativas mais gerais e reflexivas, como formação do pensamento crítico, orientação para o futuro e alfabetização quântica. Argumentam que o estudo da Computação Quântica oferece aos alunos uma visão de longo prazo sobre o possível impacto dessa tecnologia na sociedade e na ciência, preparando-os para um futuro em que a tecnologia quântica desempenhará um papel significativo. Destacamos o artigo de Rasa, Palmgren e Laherto [65] que se motiva pela capacidade que o estudo da CQ pode fornecer para uma perspectiva sobre as promessas e os perigos da ciência e tecnologia, “a fim de reforçar a participação ativa e responsável num mundo complexo e incerto” [64, p. 4, trad. nossa]. Nita *et al.* [47] afirmam que o avanço na CQ, exigirá “ferramentas inovadoras de educação e de formação e um aumento do nível de alfabetização quântica” [47, p. 3, trad. nossa], com o objetivo de democratizar o acesso a essa tecnologia e permitir que um público mais amplo compreenda e participe do desenvolvimento das tecnologias quânticas.

**Em síntese**, podemos observar que existe uma grande preocupação com o avanço tecnológico que as tecnologias

quânticas irão proporcionar ( $n = 25$ ) e com a formação de mão de obra especializada para indústria ( $n = 24$ ). Também se observa atenção ao potencial da CQ para a aprendizagem de Física ( $n = 13$ ) ou para uma formação mais geral ( $n = 4$ ). No entanto, não se identificou suficiente atenção com a formação de professores, indispensável para ensinar e motivar a futura geração de contribuidores de CQ. Apenas o trabalho de Aiello *et al.* [52] oferece recomendações e orientações para a formação de educadores na área.

### 3.3. Quais as ferramentas e recursos utilizados para ensinar computação quântica?

Ao responder essa questão de pesquisa, consideramos que ferramentas são usadas pelos professores e estudantes para construir, experimentar e aplicar conhecimentos teóricos na prática; são interativas e permitem a execução de tarefas específicas; por exemplo, *softwares*, simulações, jogos e materiais experimentais. Já os recursos são materiais de apoio que fornecem informações, explicações, reflexões e/ou bases teóricas para a compreensão dos tópicos em estudo; não requerem interatividade; por exemplo, livros, textos, vídeos e documentários. Passamos a apresentar as ferramentas e, posteriormente, os recursos.

#### 3.3.1. Ferramentas

As ferramentas foram classificadas nas seguintes categorias emergentes da análise: Plataformas e Bibliotecas de Computação Quântica; Simulações e Laboratórios Virtuais; Jogos e Atividades Lúdicas; e Equipamentos e Kits Experimentais.

#### *Plataformas e bibliotecas de computação quântica*

Essa categoria abrange ambientes *online*, bibliotecas e ferramentas de programação empregadas na área da computação quântica. Dentre as ferramentas compreendidas nessa classificação, destacam-se:

- IBM-QE (*Quantum Experience*) [88], uma plataforma *online* desenvolvida pela IBM (*International Business Machines*), que proporciona acesso a processadores quânticos reais e simuladores;
- QisKit (*Quantum Information Science Kit*) [89], um *software* de código aberto destinado à programação quântica, permitindo a criação e manipulação de programas quânticos, podendo ser executados em dispositivos quânticos protótipos na infraestrutura da IBM ou em simuladores em um computador local.
- *Jupyter Notebook* [90], um ambiente de desenvolvimento *web*, que possibilita a criação e compartilhamento de documentos interativos, integrando código, equações, visualizações e texto narrativo;

<sup>5</sup> Supremacia quântica ou vantagem quântica se refere ao momento em que os computadores quânticos irão superar a capacidade dos melhores supercomputadores clássicos.

- *Quintuple* [91], um módulo de código aberto e orientado a objetos em Python que implementa a simulação do *hardware* disponível na IBM-QE;
- *Quantum Katas* [92], plataforma educacional da Microsoft, que apresenta uma série de tutoriais e exercícios de programação para aprendizagem de elementos da computação quântica e da linguagem de programação Q#;
- MATLAB [93], um *software* de alta performance que possui um pacote para construir, simular e executar algoritmos quânticos.

### **Simulações e laboratórios virtuais**

Essa categoria abrange ferramentas de simulação e ambientes virtuais projetados para facilitar a exploração e compreensão de fenômenos quânticos. Dentre os recursos compreendidos nessa classificação, destacam-se:

- QuVis (*The Quantum Mechanics Visualization*) [94], uma plataforma educacional interativa e visual destinada ao ensino de conceitos de física quântica e computação quântica, por meio de simulações;
- VQOL (*Virtual Quantum Optics Lab*) [95], ambiente virtual para a realização de experimentos virtuais relacionados a fenômenos ópticos e mecânica matricial, fundamentais para a manipulação de *qubits* e programação de algoritmos quânticos;
- *Quantum Flytrap Virtual Lab* [96], um laboratório virtual que oferece uma experiência interativa, permitindo aos usuários explorar e experimentar fenômenos quânticos, como superposição, emaranhamento e dualidade onda-partícula;
- QU-VR *Education Tool* [36], uma plataforma de ensino de programação de computadores quânticos baseada em realidade virtual (VR);
- Experimento virtual de fóton único [97] oferece a oportunidade de interagir com fótons únicos em cubos divisores de feixe óptico por meio de uma interface digital.

### **Jogos e atividades lúdicas**

Nesta categoria, englobam-se seis jogos e quebra-cabeças interativos, projetados para promover o aprendizado de conceitos quânticos importantes para a computação quântica. São eles:

- *Encrypt me* [42], jogo em que os alunos assumem os papéis de *qubits* ou cientistas, explorando desigualdade de Bell, emaranhamento e criptografia quântica;
- *Entanglion* [98], jogo de tabuleiro cooperativo que introduz conceitos fundamentais, como estados quânticos, portas quânticas e emaranhamento;
- *Quantum Moves* [99], plataforma de jogo científico na qual os participantes enfrentam desafios específicos na pesquisa para desenvolver computadores quânticos;

- *Quantum Tic-Tac-Toe* [100, 101] adapta o clássico jogo da velha para ensinar emaranhamento quântico, permitindo escolhas de *qubits* em vez de X ou O;
- *Endless Fun* [40], jogo de cartas introdutório à computação quântica, possibilitando aos participantes construir seus próprios computadores quânticos de alta dimensão e explorar conceitos como superposição e emaranhamento;
- *Entanglement Ball* [68] utiliza a queimada como metáfora para apresentar o emaranhamento quântico, com participantes atuando como *qubits* emaranhados com jogadores adversários;
- Visualização de quebra-cabeças [46] utiliza elementos de jogos, como quebra-cabeças interativos, para facilitar a aprendizagem e a compreensão de conceitos da computação quântica. Os participantes interagem com peças de quebra-cabeça que representam estados quânticos, operadores quânticos e transformações quânticas, e são desafiados a resolver problemas relacionados a esses conceitos.

### **Equipamentos e kits experimentais**

Nesta categoria, destacam-se ferramentas que fazem uso de equipamentos ópticos e kits experimentais para proporcionar experiências práticas:

- *Thorlabs Demonstration Kit* [102] é um conjunto de ferramentas e componentes ópticos, incluindo lasers, lentes, espelhos, divisores de feixe, filtros ópticos, detectores, suportes e acessórios de montagem. Esses elementos são fundamentais para aplicações em óptica e fotônica;
- Interferômetro de Mach-Zehnder físico, um aparato experimental que combina divisores de feixe, espelhos, polarizadores e detectores para a simulação de algoritmos quânticos e portas quânticas;
- Blocos de LEGO como um análogo do cálculo ZX.

### **3.3.2. Recursos**

Os recursos identificados nos artigos são poucos e, de maneira geral, consistem em textos. Entre eles, destaca-se o *Manifesto Quântico* [103], um documento elaborado pela comunidade acadêmica europeia em 2016 como um apelo para a formulação de uma estratégia para que a Europa liderasse a Segunda Revolução Quântica. Em seguida, temos o conto de fantasia intitulado *Um antigo computador de corda e polia é descoberto na selva de Araphul* [104], que descreve a descoberta de um arranjo de cordas e roldanas que apresenta a realização concreta do bit e das portas lógicas. Além disso, são mencionadas por Bitzenbauer e Zenger [30] fontes primárias de Física, como por exemplo Maiman [105], Bennett e Brassard [11] e Arute *et al.* [106].

Para além dos textos, destacam-se os livros mais citados nos artigos. Embora não sejam mencionados explicitamente como materiais de apoio para as abordagens

de ensino, acreditamos que essas referências podem ser úteis para leitores interessados em diferentes abordagens de CQ. Entre esses livros estão: *Computação Quântica e Informação Quântica* de Nielsen e Chuang [107], que se aprofunda nos resultados centrais de *QIST* e é voltado principalmente para estudantes de graduação; *Dançando com Qubits* de Sutor [108] apresenta-se como uma introdução leve à computação quântica destinada a uma ampla audiência; *Ciência da Computação Quântica* de Mermin [109], voltado principalmente a cientistas da computação sem conhecimento sobre a teoria quântica,

mas que procuram aprender elementos de computação quântica; e *Computação Quântica para Curiosos Quânticos* de Hughes *et al.* [110], que utilizam uma linguagem simples, pouca matemática e vários exemplos para introduzir conceitos fundamentais que governam os computadores quânticos, como superposição, emaranhamento e medição quântica.

Para proporcionar uma visão sintetizada das ferramentas de ensino empregados nos artigos classificados na categoria Fundamentos Teóricos e Práticos da Computação Quântica, a Tabela 2 correlaciona os objetivos

**Tabela 2:** Distribuição das ferramentas explicitamente utilizados em cada artigo.

Artigo	Plataformas e Bibliotecas de Computação Quântica						Simulações e Laboratórios Virtuais				Jogos e Atividades Lúdicas							Equipamentos e Kits Experimentais						
	IBM-QE	QISKit	Jupyter	MATLAB	Quantum Katas	Quintuple	QuVis	VQOL	Quantum Flytrap	QU-VR	Exp. virtual fóton único	Encrypt me	Entanglion	Quantum Moves	Quantum tic-tac-toe	Endless Fun	Entanglement Ball	Quebra-cabeças visuais	LEGO	IMZ físico	Thorlabs Kit	Lasers e lentes	Polarizadores	Interf. de fóton único
Alves e Felipe [28]	X	X	X																					
Alves <i>et al.</i> [29]	X																							
Brody e Guzman [30]	X	X	X																					
Candela [31]				X																				
Carrascal <i>et al.</i> [32]	X	X	X																					
Genç <i>et al.</i> [36]	X		X		X				X															
Jesus <i>et al.</i> [34]	X	X	X																					
Kain [39]	X	X																						
Moran [44]	X					X																		
Morrell Jr. <i>et al.</i> [45]	X	X		X																				
Oliveira <i>et al.</i> [47]	X	X																						
Rabelo e Costa [48]	X																							
Ross [49]				X																				
Salehi <i>et al.</i> [65]		X	X																					
Santos [50]	X																							
Angara <i>et al.</i> [70]	X	X	X									X												
Bitzenbauer e Zenger [29]										X														
Bungum e Selstø [57]	X																							
Coecke <i>et al.</i> [33]																		X						
Dzurak <i>et al.</i> [53]	X																			X	X	X	X	X
Grosman <i>et al.</i> [35]																			X					
Hughes <i>et al.</i> [71]	X													X										
Kopf <i>et al.</i> [40]															X									
López-Incera <i>et al.</i> [42]											X													
Magnussen <i>et al.</i> [62]													X											
Marckwordt <i>et al.</i> [67]																	X							
Migdal <i>et al.</i> [43]								X																
Nita <i>et al.</i> [46]																	X							
Satanassi [69]							X																	
Satanassi <i>et al.</i> [76]							X																	
Sutrini <i>et al.</i> [51]																			X		X	X		
Vianna <i>et al.</i> [52]																				X	X			
Kohnle e Rizzoli [61]							X																	
Lethen [41]																				X				
Lukishova [73]																			X		X	X	X	
Rasa <i>et al.</i> [64]	X																							
Walsh <i>et al.</i> [68]	X						X																	

centrais de cada trabalho com as respectivas ferramentas educacionais utilizadas, quando explicitamente mencionadas.

### 3.4. Quais conteúdos têm sido ensinados na computação quântica?

Dentre os artigos incluídos desta revisão, dois se destacam por justificarem a seleção de tópicos a serem ensinados: Burgum e Selstø [58], que propõem um curso integrado de conhecimentos de Física e Computação Quântica para estudantes de nível superior, e Singh, Levy e Levy [56], que propõem um paralelo entre física clássica e física quântica para estudantes pré-universitários. Já Westfall e Leider [111] focam na criação de programas em computador quântico, por parte de estudantes de ensino médio e de graduação. Vamos apresentar brevemente os tópicos sugeridos nesses trabalhos e, posteriormente, indicamos quais são os conteúdos mais trabalhados no conjunto de artigos que integram essa revisão.

Bungum e Selstø [58] argumentam que o ensino de *QIST* em nível superior para estudantes que não têm base sólida em Física seja feito por meio de um curso que integre conhecimentos de Física e programação quântica. Para tanto, especialmente embasados em Rieffel e Polak [112] propõem um conjunto com oito tópicos-chave, que abrangem desde princípios fundamentais da MQ até sua aplicação em algoritmos quânticos e codificação. Os tópicos-chaves selecionados são: função de onda, dinâmica de movimento de uma função de onda, quantização, emaranhamento, algoritmos quânticos, portas quânticas universais e soluções quânticas para a otimização de problemas.

Singh, Levy e Levy [56] defendem a importância de ensinar conceitos de *QIST* a estudantes pré-universitários para inspirá-los a ingressar nessa área. Propõem cinco conceitos-chave básicos: i) estado clássico e estado quântico; ii) superposição de ondas clássicas e superposição quântica; iii) bits e *qubits*; iv) medição e medição quântica; e v) processamento de informação nos computadores clássicos e em computadores quânticos; e sugerem que tópicos como emaranhamento quântico, distribuição de chaves quânticas, teletransporte quântico e internet quântica podem ser acrescentados aos conceitos-chave básicos.

Westfall e Leider [111] identificam as ideias fundamentais sobre CQ necessárias para que estudantes do ensino médio e de graduação comecem a escrever e executar programas simples em um computador quântico. Começam fazendo um paralelo entre computação clássica e quântica, explicando a diferença entre bits e *qubits*, e a representação de *qubits* como vetores no espaço tridimensional usando a esfera de Bloch. Em seguida, apresentam operações com matrizes para introduzir noções de álgebra linear necessárias para a CQ. Seguem-se operações com portas quânticas (de Pauli e Hadamard) em um *qubit*, e também com portas de múltiplos *qubits*,

como a CNOT, explicando sua ação no *qubit* alvo e no *qubit* de controle. A medição é discutida como penúltimo tópico, destacando o caráter probabilístico do resultado do *qubit*.

Em relação aos conteúdos abordados nos 50 artigos incluídos em nossa análise, há uma variedade de tópicos relacionados à Computação Quântica, pois é um campo multidisciplinar integrando conhecimentos de Mecânica Quântica, Informação Quântica e outras áreas. A Mecânica Quântica fornece a base teórica e os princípios fundamentais que sustentam a CQ, como a superposição, a interferência quântica e o emaranhamento. Por outro lado, a Informação Quântica contribui com tópicos como correção quântica de erros, criptografia quântica e distribuição de chaves quânticas.

No escopo da nossa revisão, identificamos os conteúdos centrais frequentemente abordados nos trabalhos: superposição e emaranhamento quântico [40, 42, 43, 46, 68, 71, 72, 74, 75]; circuitos, portas e algoritmos quânticos [28, 30–36, 39, 43–45, 47, 48, 50, 52, 66]; e aplicações da CQ, como a criptografia quântica [37, 41–43, 49, 62] e o teletransporte quântico [37, 43, 67].

Em relação aos conteúdos tratados no ensino de Mecânica Quântica, Souza *et al.* [17] alertam que os tópicos abordados ainda são poucos, focando em temas como estabilidade do átomo, dualidade onda-partícula, princípio da incerteza, quantização, fótons e elétrons, deixando de lado questões importantes como superposição de estados e problema da medida. Já a presente revisão mostra que esses dois tópicos são tratados com frequência nos trabalhos analisados. A superposição de estados é um fenômeno central que permite aos *qubits* existirem em uma combinação de estados 0 e 1 simultaneamente, o que confere poder de processamento. Além disso, a superposição de estados também está intimamente ligada ao problema da medida e à interferência quântica, pois ao medir um *qubit*, seu estado quântico colapsa, levando-o a assumir um valor definido.

O emaranhamento quântico é outro conceito central da CQ, consequência direta da superposição e interferência de estados, sendo importante para a realizações de operações quânticas como a implementação de portas e algoritmos quânticos, e no teletransporte e criptografia quântica. Nesse contexto, Kohle e Deffebach [113] destacam que frequentemente o emaranhamento é ignorado nos trabalhos sobre as dificuldades dos alunos em MQ.

A criptografia quântica e o teletransporte quântico desempenham papéis importantes na aplicação tecnológica da Computação Quântica devido à capacidade de estabelecer canais seguros de transmissão de informações e permitir a transferência de estados quânticos. Isso é realizado por meio da codificação da informação em estados quânticos não ortogonais, como fótons únicos polarizados em 0, 45, 90 e 135 graus. Essa técnica resulta na criação de um canal de comunicação no qual as transmissões não podem ser lidas ou copiadas de forma confiável por um intruso [11]. Dessa forma, a criptografia e o teletransporte quântico são explorados



a ciência e pela colaboração com cientistas. Satanassi, Ercolessi e Levri [67] criam uma abordagem de ensino inovadora para trabalhar CQ, visando ampliar o potencial educacional e cultural da computação quântica, no âmbito do *I SEE Project*<sup>6</sup>. Em particular, discutem detalhadamente o módulo referente ao teletransporte quântico, para demonstrar a aplicação dos princípios de *design* propostos. Os resultados de um estudo piloto indicam que a abordagem é promissora para criar um ambiente de aprendizado inclusivo e produtivo, pois os alunos se sentiram encorajados a buscar maneiras pessoais de combinar diferentes níveis de discurso (narrativo, lógico, matemático, técnico-experimental) e gerar descrições significativas do fenômeno do teletransporte quântico.

Os autores sugerem que a abordagem desenvolvida pode ser expandida e ajustada para incluir outros tópicos avançados de *STEM*; e destacam a importância de continuar a pesquisa e a implementação de materiais educativos sobre tecnologias quânticas para preparar melhor os estudantes para o futuro das ciências e tecnologias.

Também no âmbito do *I SEE Project*, e classificado na subcategoria Outros Objetivos, Rasa, Palmgren e Laherto [65] investigaram como um curso inovador que combina fundamentos de computação quântica e pensamento sobre o futuro pode influenciar as percepções dos alunos sobre o futuro e sobre a sua própria agência. Para tanto, criaram e ofereceram um curso sobre “*Computadores Quânticos e o Futuro das TIC*”, que enfatiza exercícios de pensamento sistêmico e técnica de construção de cenários ao trabalhar com os conceitos de spin e superposição quântica, por exemplo. Como resultado, os alunos apresentaram mudanças positivas em suas percepções sobre ciência e tecnologia, demonstrando um aumento do interesse e do senso de propósito em contribuir para carreiras *STEM*; assim como uma visão mais aberta e imaginativa da ciência, considerando-a como um campo dinâmico e não determinista. Ainda assim, os autores reconhecem que em futuras implementações de cursos semelhantes é preciso fortalecer a conexão entre o conteúdo científico e os exercícios de construção de cenários futuros.

Dentre as recomendações, destacamos a necessidade de maior ênfase em promover uma visão crítica sobre as mudanças sociotécnicas e evitar a percepção de que a tecnologia é uma solução única para os problemas globais.

Já Kohnle e Rizzoli [62], interessados no ensino de protocolos de distribuição de chaves quânticas (*Quantum Key Distribution* – QKD), desenvolveram quatro simulações interativas, que utilizam fótons polarizados

ou partículas com spin 1/2 como realizações físicas de *qubits*, para demonstrar princípios básicos de diferentes protocolos de QKD. Com base no feedback dos estudantes, avaliaram e refinaram as simulações construídas, melhorando a compreensão de conceitos como superposição, estados incompatíveis, e o colapso de estado quântico durante a medição.

Os autores recomendam a integração de tópicos de informação quântica, como QKD, nos cursos de MQ desde os níveis introdutórios, para aproveitar seu potencial educacional e relevância prática, assim como o uso das simulações desenvolvidas no *QuVis Quantum Mechanics Visualization Project* para apoiar o ensino e a aprendizagem de QKD. Ainda apontam a necessidade de continuar desenvolvendo e avaliando recursos didáticos baseados em simulações para outras áreas da Mecânica Quântica e Tecnologia da Informação Quântica.

A categoria de mapeamentos ( $n = 5$ ) só contém estudos desenvolvidos no EUA, mostrando o grande esforço que esse país tem despendido para ser um dos líderes mundiais da Segunda Revolução Quântica. Três dessas pesquisas visam investigar a situação atual e perspectivas futuras relativas à empregabilidade e à preparação de pessoal para atender as demandas da Indústria Quântica (IQ). São estudos abrangentes e robustos, que partem de levantamentos junto a empresas e instituições associadas à IQ, para identificar as demandas de conhecimentos, habilidades e competências requeridas para a formação de força de trabalho, tanto em nível técnico [60], quanto em nível superior (graduação e pós-graduação) em áreas diversas *STEM* [59, 61]. A partir dessa identificação, pretendem dar orientações para líderes e administradores de instituições de ensino superior interessados em incorporar tópicos de tecnologias quânticas em seus currículos [60, 61] ou desenvolver um currículo para a formação de técnicos qualificados [60]. É marcante o cuidado para a elaboração de questionários que captem as reais necessidades da IQ. Por exemplo, o questionário utilizado por Hughes *et al.* [61] foi elaborado pelo *QED-C Workforce Technical Advisory Committee* com base em 400 anúncios de empregos divulgados na internet.

Dentre as principais habilidades e competências identificadas como essenciais para a formação de técnicos quânticos, segundo o levantamento de Hasanovic *et al.* [59], incluem-se conhecimento em tecnologias ópticas e fotônicas; habilidades práticas em manuseio e alinhamento de lasers, armadilhas de íons, sistemas criogênicos, entre outros equipamentos quânticos; e compreensão das teorias quânticas fundamentais que suportam essas tecnologias. Os autores recomendam que haja um esforço conjunto das instituições acadêmicas americanas, com acesso aberto aos materiais educacionais, laboratórios e outros conteúdos instrucionais; e acreditam que a atual força de trabalho em fotônica possa ser um ponto de partida para formar a nova força de trabalho quântica, dada a interseção significativa entre essas áreas.

<sup>6</sup> Esses autores fazem parte do grupo da Universidade de Bolonha que coordenou o projeto europeu intitulado *Inclusive STEM Education to Enhance the capacity to aspire and imagine future careers (I SEE Project)*, envolvendo sete parceiros. Disponível em: <https://iseeproject.eu/>.

Em relação à formação de nível superior, os principais resultados de Fox, Zwickl e Lewandowski [59] revelaram que as habilidades mais valorizadas pelas empresas incluem uma compreensão sólida dos princípios de mecânica quântica e suas aplicações tecnológicas, programação quântica, conhecimento em teoria da informação quântica e habilidades experimentais. Quanto à formação acadêmica, o nível de doutorado é considerado como a melhor preparação para ingressar na indústria quântica. Entretanto, as empresas destacaram a importância de modificações nos programas de doutorado para aprimorar a preparação dos estudantes, enfatizando a necessidade de maior experiência em desenvolvimento de *software* colaborativo, habilidades de trabalho em equipe e noções do funcionamento do mundo corporativo. Os autores destacam que as indústrias estão contratando engenheiros, físicos e cientistas da computação com a expectativa de que esses profissionais sejam treinados pelas próprias empresas. Por fim, sugerem que as instituições de ensino adaptem os currículos existentes para incluir módulos sobre tecnologias quânticas e suas aplicações práticas; criem parcerias com a indústria quântica para oferecer estágios e experiências práticas para os alunos; desenvolvam cursos interdisciplinares que integrem física quântica com engenharia e ciência da computação e implementem programas de certificação e educação continuada focados em tecnologias quânticas específicas.

Em relação à empregabilidade, Hughes *et al.* [61] identificaram que há uma demanda por diversos profissionais; 95% das empresas contratam engenheiros; 86%, físicos experimentais; 57%, teóricos; e 43%, técnicos. Quanto às habilidades, a indústria valoriza profissionais com competências em programação clássica (90% das empresas), métodos estatísticos para a análise de dados (87%) e experiência de laboratório (87%). Vale destacar que nem todos os empregos exigem habilidades quânticas específicas, indicando uma diversidade nas exigências do mercado. Em relação à formação acadêmica, a pesquisa revelou que a indústria dá mais importância aos níveis de mestrado e doutorado do que ao bacharelado. Os autores recomendam que as instituições de ensino superior desenvolvam programas que incorporem habilidades específicas da indústria quântica, focando não apenas em física, mas também em engenharia e ciência da computação, por exemplo, algoritmos quânticos e a aplicação prática de tecnologias quânticas. Também recomendam a criação de parcerias entre a academia e a indústria para garantir que os programas educacionais estejam alinhados com as necessidades do mercado, facilitando a transição dos graduados para a força de trabalho quântica.

Os mapeamentos de ensino pretendem identificar as reais condições de ensino de Ciência da Informação Quântica nos EUA no que diz respeito ao uso de experimentos de óptica quântica em nível de graduação [57]; e

nas práticas de ensino e as perspectivas dos instrutores de cursos de *QIS* [64].

Os resultados de Borish e Lewandowski [57] mostram que os experimentos de fóton único são usados em vários cursos de graduação, com objetivos de aprendizagem que vão desde a compreensão conceitual até o desenvolvimento de habilidades laboratoriais e de pensamento crítico. Os instrutores relataram diversos benefícios dos experimentos, incluindo uma maior motivação dos alunos para entender a teoria quântica e um aumento no interesse em carreiras relacionadas à óptica quântica e à informação quântica. Também disseram que os objetivos de aprendizagem incluem tanto a compreensão de conceitos quânticos como o desenvolvimento de habilidades práticas de laboratório. No entanto, os autores alertam que a complexidade técnica e conceitual dos experimentos requer uma preparação significativa dos instrutores.

Dentre as recomendações, os autores apontam para a necessidade de: i) desenvolver opções de menor custo para que mais instituições possam oferecer esses experimentos a seus estudantes; ii) criação de estratégias para balancear a prática de habilidades técnicas com a realização dos experimentos, de modo a maximizar os benefícios educacionais e iii) estudos futuros que avaliem diretamente a eficácia desses experimentos na aprendizagem dos estudantes, com o objetivo de formular perguntas de pesquisa e metodologias que melhorem a compreensão e o ensino da óptica quântica.

Em relação às práticas de ensino e as perspectivas dos instrutores de cursos de, Meyer *et al.* [64] identificaram que existe uma variedade de formações acadêmicas dos instrutores de *QIS*, provenientes de departamentos diversos como Física, Ciência da Computação, Engenharia Elétrica e Matemática. Também identificaram diversidade nos objetivos relacionados à aprendizagem dos alunos. Alguns instrutores possuíam perspectivas diferentes sobre a importância de tópicos como programação quântica e física quântica. Diante desses resultados, os autores chamam a atenção de que há uma pressão por maior padronização dos tópicos abordados e dos objetivos de aprendizagem, e alertam para a necessidade de pesquisas em educação baseada na disciplina (*Discipline Based Education Research – DBER*).

Uma síntese de nossa avaliação sobre os principais resultados e recomendações encontra-se na Tabela 3.

## 4. Conclusões

Nesta revisão da literatura, apresentamos o estado da arte sobre o ensino de Computação Quântica (CQ) e sintetizamos, nas cinco subseções da seção 3, os principais achados em resposta a cada uma das questões de pesquisa enunciadas.

**Tabela 3:** Principais resultados e recomendações das pesquisas.

Referência	Principais resultados	Principais recomendações
Salehi, Seskir e Tepe, 2022 [66]	A introdução da CQ como uma generalização da computação probabilística aumenta os conhecimentos básicos dos alunos.	Desenvolver materiais para o ensino de CQ para não-físicos.
Bungum e Selstø, 2022 [58]	Os alunos de TI enfrentam desafios conceituais semelhantes aos descritos em pesquisas educacionais em Física Quântica.	Promover discussões entre os estudantes e suporte adicional na matemática avançada.
Magnussen <i>et al.</i> , 2014 [63]	O jogo <i>Quantum Moves</i> foi motivador ao possibilitar a participação em experimentos científicos autênticos e ao aumentar o interesse pela ciência.	Conectar os desafios de pesquisa ao currículo central dos alunos.
Satanassi, Ercolessi e Levrini [67]	A abordagem proposta é promissora para criar um ambiente de aprendizado inclusivo, pois incentiva os alunos a combinar diferentes níveis de discurso e gerar descrições significativas do teletransporte quântico.	Continuar a pesquisa e a implementação de materiais educativos sobre as tecnologias quânticas.
Rasa, Palmgren e Laherto, 2022 [65]	O curso oferecido melhorou as percepções dos alunos sobre ciência e tecnologia, e aumentou o interesse em ingressar em carreiras <i>STEM</i> .	Promover uma visão crítica sobre as mudanças sociotécnicas e evitar a percepção de que a tecnologia é a única solução para os problemas globais.
Kohnle e Rizzoli, 2017 [62]	As simulações interativas de QKD melhoraram a compreensão de conceitos quânticos.	Integrar tópicos de informação quântica desde níveis introdutórios.
Hasanovic <i>et al.</i> , 2022 [60]	A indústria quântica valoriza conhecimentos em tecnologias ópticas e fotônicas, como lasers, armadilhas de íons e sistemas criogênicos, bem como em teorias quânticas.	Estabelecer parcerias entre as instituições acadêmicas americanas para compartilhar recursos de ensino e pesquisa.
Fox, Zwickl e Lewandowski, 2020 [59]	As principais habilidades valorizadas pela IQ são conhecimentos em princípios de MQ e suas aplicações tecnológicas, programação quântica, teoria da informação quântica e habilidades experimentais.	Adaptar os currículos das instituições de ensino para incluir as tecnologias quânticas e criar parcerias com a indústria.
Hughes <i>et al.</i> , 2022 [61]	A IQ valoriza engenheiros e físicos com competências em programação clássica, métodos estatísticos para a análise de dados e experiência de laboratório.	Alinhar os programas educacionais com as necessidades da indústria, em particular, incluindo em seus cursos aplicações práticas de tecnologias quânticas.
Borish e Lewandowski, 2023 [57]	Os experimentos de fóton único motivam os alunos, aumentam o interesse em carreiras quânticas e desenvolvem habilidades laboratoriais.	Desenvolver opções de menor custo e criar estratégias para equilibrar habilidades técnicas e experimentos.
Meyer <i>et al.</i> , 2022 [64]	Os instrutores de <i>QIS</i> possuem formações diversas e objetivos de aprendizagem variados.	Padronizar os tópicos abordados e os objetivos de aprendizagem.

De maneira geral, podemos dizer que, embora o ensino de CQ ainda esteja em seu estágio inicial, já apresenta contribuições significativas em termos de estratégias, ferramentas e recursos de ensino. Entretanto, identificamos uma lacuna quanto à explicitação de referenciais teórico-metodológicos associados ao ensino e à aprendizagem. Isso pode resultar em falta de clareza nos objetivos educacionais, nos métodos de ensino e na avaliação dos resultados e, por consequência, se constituir em obstáculo à replicação das abordagens de ensino.

Também identificamos uma lacuna em relação à formação de professores, apesar de haver preocupação com o currículo, abordagens pedagógicas e acesso a laboratórios. Unicamente Aiello *et al.* [52] discutem a formação docente, em nível universitário, destacando a necessidade de uma ampla variedade de competências para alcançar a educação quântica e apontando que uma

das múltiplas dificuldades encontradas pelas universidades inclui “limites no talento acadêmico para ensinar” [52, p. 10]. Assim, existe necessidade de investir na formação docente para acelerar o desenvolvimento dessa área.

O interesse no ensino de CQ reside primordialmente no potencial de impacto das tecnologias quânticas em vários setores da economia global e na necessidade de formar pessoal qualificado para contribuir com o avanço da Segunda Revolução Quântica. Isso talvez explique que a estratégia mais frequente, aparecendo em 16 artigos, é a introdução da CQ por meio da programação quântica. A popularidade dessa estratégia de ensino parece estar relacionada à possibilidade de os estudantes adquirirem habilidades práticas aplicáveis na construção de circuitos quânticos, à existência de várias ferramentas que viabilizam essa estratégia, e à valorização dessa

habilidade pela indústria quântica. É preocupante, no entanto, que desses 16 artigos, um único seja de pesquisa empírica.

Compreendemos que o baixo número de pesquisas empíricas ( $n = 11$ ) e relatos de experiência (7) é reflexo do empenho de acadêmicos competentes em CQ em disseminar os conhecimentos na área e conquistar mais adeptos, enquanto ainda são raros os pesquisadores da linha educacional que adentraram nessa área. Esse achado é consistente com revisões de literatura na área de Mecânica Quântica, onde a maior parte dos trabalhos encontrados se referem a propostas. Assim, mais pesquisas delineadas cuidadosamente são necessárias para avaliar o ensino e aprendizagem de CQ.

Detectamos que, ao redor do mundo, há iniciativas governamentais com vultosos investimentos financeiros e de recursos humanos para ampliar o número de pesquisadores, educadores e estudantes qualificados em *QIST*; desenvolver mão de obra especializada; e fomentar oportunidades de currículo e pesquisas multidisciplinares, incluindo pesquisas relacionadas à educação nessa área emergente. Entretanto, só recentemente o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil criou um grupo de trabalho visando propor uma iniciativa nacional para tecnologias quânticas [115]; e não encontramos pesquisas educacionais produzidas por brasileiros(as), ainda que haja um número expressivo de publicações (9 das 50 desta revisão) produzidas em instituições nacionais. Nesse contexto, entendemos que é indispensável uma iniciativa robusta do governo brasileiro para o incentivo de pesquisa e desenvolvimento em *QIST*; e que pesquisadores em Educação em Ciências, de maneira geral, e em ensino de Física, de modo particular, adentrem nessa área de pesquisa. Em particular, é necessário investir na formação de professores para possibilitar que o país venha a se posicionar no cenário internacional em relação à Segunda Revolução Quântica.

## Agradecimentos

Vitória Luiza Fernandes Frare agradece a bolsa de mestrado proporcionada pela CAPES e Ives Solano Araujo agradece a bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

## Referências

- [1] R.P. Feynman, *International Journal of Theoretical Physics* **21**, 467 (1982).
- [2] P.W. Shor, em: *35th Annu. Symp. Found. Comput. Sci.* (Santa Fe, 1994).
- [3] J.P. Dowling e G.J. Milburn, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Sci.* **361**, 1655 (2003).
- [4] E. Dri, E. Giusto, A. Aita e B. Montrucchio, *J. Phys. Conf. Ser.* **2416**, 012002 (2022).
- [5] D.J. Egger, R. Garcia Gutierrez, J.C. Mestre e S. Woerner, *IEEE Trans. Comput.* **70**, 2136 (2021).
- [6] D.J. Egger, C. Gambella, J. Marecek, S. McFaddin, M. Mevissen, R. Raymond, A. Simonetto, S. Woerner e E. Yndurain, *IEEE Trans. Quantum Eng.* **1**, 3101724 (2020).
- [7] R. Orus, S. Mugel e E. Lizaso, *Rev. Phys.* **4**, 100028 (2019).
- [8] Y. Cao, J. Romero e A. Aspuru-Guzik, *IBM J. Res. Dev.* **62**, 6 (2018).
- [9] C.N. Cavasotto, N.S. Adler e M.G. Aucar, *Front. Chem.* **6**, 188 (2018).
- [10] L. Marchetti, R. Nifosi, P.L. Martelli, E. Da Pozzo, V. Cappello, F. Banterle, M.L. Trincavelli, C. Martini e M. D'Elia, *Brief. Bioinform.* **23**, bbac437 (2022).
- [11] C.H. Bennett e G. Brassard, *Theor. Comput. Sci.* **560**, 7 (2014).
- [12] Q. Xu e S. Zhang, *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **53**, 2131 (2010).
- [13] S.E. Yunakovsky, M. Kot, N.O. Pozhar, D. Nabokov, M.A. Kudinov, A. Guglya, E.O. Kiktenko, E. Kolycheva, A. Borisov e A.K. Fedorov, *EPJ Quantum Technol.* **8**, 14 (2021).
- [14] UNITED STATES OF AMERICA, *National Quantum Initiative Act, Public Law 115-368, December 21, 2018*. Washington, 2018. Disponível em: <https://www.congress.gov/115/statute/STATUTE-132/STATUTE-132-Pg5092.pdf>.
- [15] M.F. Riedel, D. Binosi, R. Thew e T. Calarco, *Quantum Sci. Technol.* **2**, 030501 (2017).
- [16] P. Bitzenbauer, *Educ. Sci.* **11**, 699 (2021).
- [17] R.D. S. Souza, I.M. Greca, I. Silva e E.S. Teixeira, *Rev. Bras. Pesqui. em Educ. em Ciênc.* **20**, 1363 (2021).
- [18] I.M. Greca, M.A. Moreira e V.E. Herscovitz, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **23**, 444 (2001).
- [19] I.M. Greca e M.A. Moreira, *Investig. em Ens. Ciênc.* **6**, 29 (2001).
- [20] G.C.F. Pantoja, M.A. Moreira e V.E. Herscovitz, *Rev. Bras. Ens. Ciênc. e Tecnol.* **4**, 1 (2011).
- [21] A.P. Pereira e F. Ostermann, *Investig. em Ens. Ciênc.* **14**, 393 (2016).
- [22] C. Singh e E. Marshman, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **11**, 020117 (2015).
- [23] K. Krijtenburg-Lewerissa, H.J. Pol, A. Brinkman e W.R. Van Joolingen, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **13**, 010109 (2017).
- [24] A.P. Siddaway, A.M. Wood e L.V. Hedges, *Annu. Rev. Psychol.* **70**, 747 (2019).
- [25] J.W. Creswell, *Educational Research: Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research* (Pearson, Boston, 2012), 4 ed.
- [26] V.L.F. Frare, I.S. Araujo e E.A. Veit, *Tabelas Suplementares (2024)*, disponível em: [https://if.ufrgs.br/~ives/suplementos/Tab\\_sup\\_Frare\\_Veit\\_Araujo\\_2024.xlsx](https://if.ufrgs.br/~ives/suplementos/Tab_sup_Frare_Veit_Araujo_2024.xlsx), acessado em: 14/08/2024.
- [27] E.M. Alves, F.D.S. Gomes, H.S. Santana e A.C. Santos, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **42**, e20190299 (2020).
- [28] W.M.S. Alves e J.C.C. Felipe, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **44**, e20210290 (2022).
- [29] P. Bitzenbauer e T. Zenger, *Phys. Teach.* **60**, 572 (2022).
- [30] J. Brody e G. Guzman, *Am. J. Phys.* **89**, 35 (2021).

- [31] D. Candela, *Am. J. Phys.* **83**, 688 (2015).
- [32] G. Carrascal, A.A. del Barrio e G. Botella, *J. Supercomput.* **77**, 2770 (2021).
- [33] B. Coecke, D. Horsman, A. Kissinger e Q. Wang, *Theor. Comput. Sci.* **897**, 1 (2022).
- [34] G.F. de Jesus, M.H.F. da Silva, T.G.D. Netto, L.Q. Galvão, F.G.D.O. Souza e C. Cruz, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **43**, e20210033 (2021).
- [35] P.H. Grosman, D.G. Braga e J.A. Huguenin, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **41**, e20180201 (2019).
- [36] H. Genç, S. Aydın e H. Erdal, *Comput. Appl. Eng. Educ.* **30**, 690 (2022).
- [37] M.L. How, *Mathematics* **10**, 1146 (2022).
- [38] M.A. José, J.R.C. Piqueira e R.D. Lopes, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **35**, 1306 (2013).
- [39] B. Kain, *Am. J. Phys.* **89**, 618 (2021).
- [40] L. Kopf, M. Hiekkamaki, S. Prabhakar e R. Fickler, *Am. J. Phys.* **91**, 458 (2023).
- [41] T. Lethen, *Eur. J. Phys.* **43**, 055402 (2022).
- [42] A. López-Incera, A. Hartmann e W. Dür, *Eur. J. Phys.* **41**, 065702 (2020).
- [43] P. Migdał, K. Jankiewicz, P. Grabarz, C. Decaroli e P. Cochin, *Opt. Eng.* **61**, 081808 (2022).
- [44] C.C. Moran, *Front. Phys.* **6**, 69 (2018).
- [45] A. Zaman, H.J. Morrell Jr e H.Y. Wong, *IEEE Access* **11**, 77117 (2023).
- [46] L. Nita, L. Mazzoli Smith, N. Chancellor e H. Cramman, *Res. Sci. Technol. Educ.* **41**, 564 (2023).
- [47] A.N. Oliveira, E.V.B. de Oliveira, A.C. Santos e C.J. Villas-Boas, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **44**, (2022).
- [48] W.R.M. Rabelo e M.M. Costa, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **40**, e4306 (2018).
- [49] R. Ross, *Am. J. Phys.* **88**, 483 (2020).
- [50] A.C. Santos, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **39**, e1301 (2017).
- [51] C. Sutrin, G. Zuccarini, M. Malgieri, M.C. Ceruti, G. Pancani e C. Macchiavello, *Nuovo Cimento Della Soc. Ital. Fis. C* **46**, 80 (2023).
- [52] Y. Vianna, M.R. Barros e M. Hor-Meyll, *Am. J. Phys.* **86**, 914 (2018).
- [53] C. Aiello, D. Awschalom, H. Bernien, T. Brower, K. Brown, T. Brun, J. Caram, E. Chitambar, R. Di Felice, K. Edmonds, et al., *Quantum Sci. Technol.* **6**, 030501 (2021).
- [54] A.S. Dzurak, J. Epps, A. Laucht, R. Malaney, A. Morello, H.I. Nurdin, J.J. Pla, A. Saraiva e C.H. Yang, *IEEE Trans. Quantum Eng.* **3**, 6500110 (2022).
- [55] O.N. Garcia e G. Bajwa, *J. Integr. Des. Process Sci.* **19**, 9 (2016).
- [56] C. Singh, A. Levy e J. Levy, *Phys. Teach.* **60**, 639 (2022).
- [57] V. Borish e H.J. Lewandowski, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **19**, 020144 (2023).
- [58] B. Bungum e S. Selstø, *Eur. J. Phys.* **43**, 055706 (2022).
- [59] M.F.J. Fox, B.M. Zwickl e H.J. Lewandowski, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **16**, 020131 (2020).
- [60] M. Hasanovic, C. Panayiotou, D. Silberman, P. Stimers e C. Merzbacher, *Opt. Eng.* **61**, 081803 (2022).
- [61] C. Hughes, D. Finke, D.A. German, C. Merzbacher, P.M. Vora e H.J. Lewandowski, *IEEE Trans. Educ.* **65**, 592 (2022).
- [62] A. Kohnle e A. Rizzoli, *Eur. J. Phys.* **38**, 035403 (2017).
- [63] R. Magnussen, S.D. Hansen, T. Planke e J.F. Sherson, *Electron. J. E-Learn.* **12**, 259 (2014).
- [64] J.C. Meyer, G. Passante, S.J. Pollock e B.R. Wilcox, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **18**, 010150 (2022).
- [65] T. Rasa, E. Palmgren e A. Laherto, *Instr. Sci.* **50**, 425 (2022).
- [66] Ö. Salehi, Z. Seskir e I. Tepe, *IEEE Trans. Educ.* **65**, 1 (2022).
- [67] S. Satanassi, E. Ercolessi e O. Levrini, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **18**, 010139 (2022).
- [68] J. Marckwordt, A. Muller, D. Harlow, D. Franklin e R.H. Landsberg, *Phys. Teach.* **59**, 613 (2021).
- [69] J.A. Walsh, M. Fenech, D.L. Tucker, C. Riegler-Crumb e B.R. La Cour, *Phys. Educ.* **57**, 025010 (2022).
- [70] S. Satanassi, *Nuovo Cimento Della Soc. Ital. Fis. C* **43**, 130 (2020).
- [71] P.P. Angara, U. Stege, A. MacLean, H.A. Muller e T. Markham, *IEEE Trans. Quantum Eng.* **3**, 6500110 (2022).
- [72] C. Hughes, J. Isaacson, J. Turner, A. Perry e R. Sun, *Phys. Teach.* **60**, 187 (2020).
- [73] W.C. Fowler, J.M. Ting, S. Meng, L. Li e M.V. Tirrell, *J. Chem. Educ.* **96**, 2805 (2019).
- [74] S.G. Lukishova, *Opt. Eng.* **61**, 081811 (2022).
- [75] J. Batle, M. Abutalib e S. Abdalla, *Rev Mex Fis E* **63**, 1 (2017).
- [76] D.V. Schroeder, *Am. J. Phys.* **85**, 812 (2017).
- [77] S. Satanassi, P. Fantini, R. Spada e O. Levrini, *J. Phys. Conf. Ser.* **1929**, 012053 (2021).
- [78] L. Branchetti, M. Cutler, A. Laherto, O. Levrini, E.K. Palmgren, G. Tasquier e C. Wilson, *Vis. Sustain.* **9**, 10 (2018).
- [79] F. Flórez, R. Casallas, M. Hernández, A. Reyes, S. Restrepo e G. Danies, *Review of Educational Research* **87**, 834 (2017).
- [80] Y.C. Hsu, N.R. Irie e Y.H. Ching, *TechTrends* **63**, 260 (2019).
- [81] Y.B. Kafai e C. Proctor, *Educational Researcher* **51**, 146 (2022).
- [82] J.S. Netto, F. Ostermann e C.J.D.H. Cavalcanti, *Cad. Bras. Ens. Fís.* **35**, 185 (2018).
- [83] F. Ostermann, A. Pereira, C.J.D.H. Cavalcanti e O. Pessoa Jr., *Cad. Bras. Ens. Fís.* **29**, 831 (2012).
- [84] F. Ostermann, C.J.H. Cavalcanti, S. D. Prado e T. dos S. F. Ricci, *Rev. Electrónica Enseñ. Las Cienc.* **8**, 1094 (2009).
- [85] T.F. Ricci, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **29**, 79 (2007).
- [86] A.C. Da Silva e M.J.P.M. De Almeida, *Cad. Bras. Ens. Fís.* **28**, 624 (2011).
- [87] M.G. Raymer e C. Monroe, *Quantum Sci. Technol.* **4**, 020504 (2019).
- [88] IBM-QE, disponível em: <https://quantum.ibm.com/>, acessado em: 12/07/2024.
- [89] Qiskit, disponível em: <https://ibm.com/quantum/qiskit>, acessado em: 12/07/2024.
- [90] Jupyter Notebook, disponível em: <https://jupyter.org>, acessado em: 12/07/2024.
- [91] Quintuple, disponível em: <https://github.com/corbett/QuantumComputing>, acessado em: 12/07/2024.

- [92] Quantum Katas, disponível em: <https://quantum.microsoft.com/en-us/experience/quantum-katas>, acessado em: 12/07/2024.
- [93] MATLAB, disponível em: <https://www.mathworks.com/products/quantum-computing.html>, acessado em: 12/07/2024.
- [94] QuVis, disponível em: <https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>, acessado em: 12/07/2024.
- [95] VQOL, disponível em: <https://www.vqol.org/>, acessado em: 12/07/2024.
- [96] Quantum Flytrap Virtual Lab, disponível em: <https://quantumflytrap.com/virtual-lab/>, acessado em: 12/07/2024.
- [97] P. Bronner, A. Strunz, C. Silberhorn e J.P. Meyn, Eur. J. Phys. **30**, 345 (2009).
- [98] Entanglion, disponível em: <https://entanglion.github.io/>, acessado em: 12/07/2024.
- [99] Quantum Moves, disponível em: <https://www.scienceathome.org/games/quantum-moves-2/>, acessado em: 12/07/2024.
- [100] Quantum Tic-Tac-Toe, disponível em: <https://quantumtictactoe.com/play/>, acessado em: 14/08/2024.
- [101] A. Goff, Am. J. Phys. **74**, 962 (2006).
- [102] Thorlabs Demonstration Kit, disponível em: <https://www.thorlabs.com>, acessado em: 12/07/2024.
- [103] A. de Touzalín, C. Marcus, F. Heijman, I. Cirac, R. Murray e T. Calarco, *Quantum Manifesto. A New Era of Technology*, disponível em: <http://www.qtflagship.cnr.it/wp-content/uploads/2016/10/Quantum-Manifesto.pdf>.
- [104] A. Davison (ed.), *Humour The Computer* (The MIT Press, Cambridge, 1995).
- [105] T.H. Maiman, Nature **187**, 493 (1960).
- [106] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J.C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F.G.S.L. Brandao, D.A. Buell, et al., Nature. **574**, 505 (2019).
- [107] M.A. Nielsen e I.L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010).
- [108] R.S. Sutor, *Dancing with Qubits: How Quantum Computing Works and How It May Change the World* (Packt, Birmingham, 2019).
- [109] N.D. Mermin, *Quantum Computer Science: An Introduction* (Cambridge University Press, Cambridge, 2007).
- [110] C. Hughes, J. Isaacson, A. Perry, R.F. Sun e J. Turner, *Quantum Computing for the Quantum Curious* (Springer, Cham, 2021).
- [111] L. Westfall e A. Leider, Proc. Future Technol. Conf. FTC 2018 **881**, 63 (2019).
- [112] E.G. Rieffel e W. Polak, ACM Comput. Surv **32**, 300 (2000).
- [113] A. Kohnle e E. Deffebach, em: *2015 Physics Education Research Conference* (College Park, 2015).
- [114] A.K. Fedorov, A.A. Kanapin, V.L. Kurochkin, Y.V. Kurochkin, A.V. Losev, A.V. Miller, I.O. Pashinskiy, V.E. Rodimin e A.S. Sokolov, em: *Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016"* (Moscow, 2016).
- [115] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, *PORTARIA MCTI n° 8.194*, de 19 de maio de 2024, disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-mcti-n-8.194-de-19-de-maio-de-2024-560755075>, acessado em 13/07/2024.