

Programação em Chips Quânticos e Estados Topológicos da Matéria: Caminhos para Computação do Futuro

Disraeli Filho¹, Luís Felipe Nonato¹

¹Departamento de Engenharia de Computação – Instituto Federal da Paraíba (IFPB)
Campina Grande – PB – Brasil

disraeli.costa@academico.ifpb.edu.br, felipe.nonato@academico.ifpb.edu.br

Abstract. *This article presents a literature review on programming in quantum chips and the study of topological states of matter, areas that have emerged as fundamental for the future of computing. Qubits based on topological states, such as Majorana quasiparticles, offer faster and more fault-tolerant operations compared to traditional technologies. The literature indicates that this progress requires the development of new hardware, specific programming languages, and algorithms, as well as the integration of topological materials to address challenges such as error correction and scalability. In this context, the field is established as essential for innovative applications in science, cryptography, artificial intelligence, and the simulation of complex systems, pointing to a significant transformation in the technological landscape in the coming decades. (SWAN; DOS SANTOS; WITTE, 2022)*

Resumo. *Este artigo apresenta uma revisão literária sobre a programação em chips quânticos e o estudo dos estados topológicos da matéria, áreas que vêm se destacando como fundamentais para o futuro da computação. Qubits baseados em estados topológicos, como as quasipartículas de Majorana, oferecem operações mais rápidas e tolerantes a falhas em comparação às tecnologias tradicionais. A literatura aponta que esse avanço demanda o desenvolvimento de novos hardwares, linguagens de programação e algoritmos específicos, além da integração de materiais topológicos para superar desafios como correção de erros e escalabilidade. Assim, o campo se consolida como essencial para aplicações inovadoras em ciência, criptografia, inteligência artificial e simulação de sistemas complexos, indicando uma transformação significativa no cenário tecnológico das próximas décadas. (SWAN; DOS SANTOS; WITTE, 2022)*

1. Introdução

Nas últimas décadas, os métodos tradicionais de computação, fundamentados na miniaturização progressiva dos transistores de silício, proporcionaram avanços expressivos em desempenho e eficiência energética. Contudo, à medida que nos aproximamos dos limites físicos delineados pela Lei de Moore e diante do crescimento acelerado da demanda por processamento de dados em áreas como inteligência artificial e simulação de sistemas complexos, tornam-se cada vez mais evidentes as limitações dos chips convencionais, especialmente em relação à dissipação térmica e à escalabilidade.

Nesse cenário, a computação quântica surge como um paradigma alternativo, ao propor o uso de qubits — unidades fundamentais de informação quântica — que se valem de fenômenos como superposição e entrelaçamento para executar operações além do alcance das arquiteturas clássicas. Entre as estratégias mais promissoras para a construção de chips quânticos robustos, destacam-se os estados topológicos da matéria, cuja estabilidade intrínseca frente a perturbações ambientais favorece a criação de qubits topológicos. Esses qubits, baseados em quasipartículas como os férmions de Majorana, apresentam maior tolerância à decoerência e a falhas operacionais, superando obstáculos críticos enfrentados por sistemas quânticos convencionais.

Resultados recentes, como a observação experimental de modos de Majorana em nanofios supercondutores (Mourik et al., Science, 2012), evidenciam o potencial disruptivo dessa linha de pesquisa, mas também ressaltam desafios técnicos consideráveis — desde a síntese controlada de materiais topológicos até o desenvolvimento de algoritmos e linguagens de programação compatíveis com a lógica não abeliana desses sistemas. A integração desses elementos é essencial para viabilizar aplicações estratégicas em criptografia pós-quântica, otimização de redes neurais e modelagem de fenômenos quânticos em escalas inéditas.

Este artigo tem como objetivo revisar criticamente os avanços recentes na programação de chips quânticos baseados em estados topológicos da matéria, discutindo os principais desafios tecnológicos e as perspectivas para a consolidação desse novo paradigma. Ao analisar a literatura especializada, buscamos esclarecer o papel da integração entre hardware topológico e novas arquiteturas de software, destacando sua importância para o futuro da ciência e da indústria em um contexto de transição para a computação quântica em larga escala.

2. Métodos

Esta seção descreve a metodologia adotada para a condução da presente revisão literária, cujo objetivo principal foi mapear e analisar criticamente os avanços recentes na área de programação em chips quânticos baseados em estados topológicos da matéria.

A busca por literatura relevante foi conduzida em bases de dados científicas e acadêmicas reconhecidas, incluindo, mas não se limitando a, IEEE Xplore, ACM Digital Library, Web of Science, Scopus, Google Scholar e o repositório de pré-publicações arXiv. As palavras-chave utilizadas, em combinações variadas e nos idiomas português e inglês, abrangeram termos como "computação quântica", "programação quântica", "chips quânticos", "arquiteturas quânticas", "estados topológicos da matéria", "qubits topológicos", "férmions de Majorana", "quantum computing", "quantum programming", "quantum chips", "quantum architectures", "topological states of matter", "topological qubits", e "Majorana fermions".

Os critérios de inclusão para a seleção dos artigos consideraram a relevância direta para o tema central da revisão, o tipo de publicação (priorizando artigos de periódicos revisados por pares, revisões sistemáticas, artigos de conferência de alto impacto e pré-publicações relevantes que apresentassem resultados significativos) e a atualidade da pesquisa, com foco em publicações recentes que refletissem os avanços mais significativos na área nos últimos anos. Artigos que não abordam explicitamente a interseção entre programação/arquitetura de chips quânticos e estados topológicos, ou que se limitavam a aspectos puramente teóricos sem conexão com a implementação ou programação, foram considerados para exclusão.

Os artigos selecionados foram submetidos a uma leitura crítica e analítica aprofundada. As informações relevantes foram extraídas de forma sistemática, focando em: conceitos fundamentais relacionados a qubits topológicos e estados da matéria, arquiteturas de hardware propostas ou em desenvolvimento, linguagens e algoritmos de programação específicos para plataformas quânticas topológicas, desafios técnicos e tecnológicos associados à síntese e manipulação de materiais topológicos e à correção de erros, e potenciais aplicações em diversas áreas do conhecimento. A síntese das informações buscou identificar padrões, tendências emergentes, lacunas de pesquisa e pontos de convergência ou divergência entre os estudos, a fim de construir uma narrativa coesa e abrangente que respondesse aos objetivos da revisão. A metodologia empregada visou garantir uma cobertura abrangente e uma análise aprofundada da literatura, fornecendo uma base sólida para as discussões e conclusões apresentadas neste trabalho.

3. Resultados

A revisão da literatura científica, conforme a metodologia descrita na Seção 2, permitiu identificar e sintetizar os principais avanços e desafios na interseção entre a programação de chips quânticos e o estudo dos estados topológicos da matéria. Os resultados da análise bibliográfica demonstram que a computação quântica, particularmente aquela baseada em qubits topológicos, é amplamente reconhecida como um paradigma promissor para superar as limitações intrínsecas da computação clássica, especialmente no que tange à escalabilidade e à tolerância a falhas.

Os estudos analisados reforçam a tese de que a estabilidade inerente dos estados topológicos da matéria, como aqueles que dão origem às quasipartículas de Majorana, confere aos qubits topológicos uma robustez significativamente maior contra a decoerência e ruídos ambientais em comparação com outras arquiteturas de qubits (SWAN; DOS SANTOS; WITTE, 2022). Esta característica é fundamental para a construção de sistemas quânticos em larga escala e para a execução de operações quânticas com alta fidelidade.

A literatura revisada também aponta para progressos experimentais notáveis, como a observação de modos de Majorana em nanofios supercondutores (MOURIK et al., 2012), validando a viabilidade física da construção de qubits baseados nesses fenômenos topológicos. Contudo, os resultados indicam que a transição da prova de conceito para a implementação prática em chips quânticos escaláveis ainda enfrenta desafios técnicos consideráveis. Estes incluem a síntese controlada e a manipulação precisa de materiais topológicos, o desenvolvimento de técnicas eficazes para o entrelaçamento e a leitura de qubits topológicos, e a superação de obstáculos relacionados à correção de erros quânticos em arquiteturas topológicas.

Adicionalmente, a revisão destaca a necessidade premente de desenvolver o ecossistema de software para a computação quântica topológica. Isso envolve a criação de novas linguagens de programação e algoritmos quânticos que possam explorar eficientemente a lógica não abeliana associada a esses sistemas, bem como ferramentas de compilação e otimização adaptadas a essas arquiteturas específicas. Os resultados da literatura sugerem que o avanço em hardware topológico deve ser acompanhado pelo desenvolvimento paralelo de software compatível para que o potencial revolucionário dessa abordagem seja plenamente realizado.

4. Discussões

Os resultados da revisão literária apresentados na Seção 3 corroboram a visão de que a computação quântica, impulsionada pela exploração de fenômenos como superposição e entrelaçamento, representa uma ruptura fundamental em relação ao paradigma clássico, cuja evolução encontra barreiras físicas cada vez mais evidentes (SWAN; DOS SANTOS; WITTE, 2022). A crescente demanda por capacidade de processamento em áreas como inteligência artificial, otimização complexa e simulação de sistemas quânticos e moleculares exige novas abordagens que transcendam os limites da Lei de Moore.

A ênfase nos estados topológicos da matéria como base para a construção de qubits reflete uma busca por robustez intrínseca, um dos maiores obstáculos na computação quântica atual. A tolerância a falhas conferida pela proteção topológica, exemplificada pelos férmions de Majorana, é um diferencial significativo que pode

simplificar os requisitos para a correção de erros quânticos, um aspecto notoriamente complexo e custoso em outras arquiteturas de qubits. A observação experimental de modos de Majorana (MOURIK et al., 2012) valida a base física dessa abordagem, movendo-a do domínio puramente teórico para o experimental.

No entanto, a transição da pesquisa fundamental para a engenharia de sistemas escaláveis é onde residem os principais desafios discutidos na literatura. A síntese e integração de materiais topológicos de alta qualidade em dispositivos semicondutores ou supercondutores, a manipulação coerente de quasipartículas e a implementação de portas lógicas quânticas baseadas em trançamento (braiding) de anyons são tarefas de engenharia de ponta que exigem inovação contínua. A escalabilidade, em particular, requer a capacidade de fabricar e controlar um grande número de qubits topológicos de forma confiável.

Paralelamente aos desafios de hardware, a literatura destaca a necessidade crítica de desenvolver o stack de software. A programação de computadores quânticos topológicos não é uma simples adaptação das linguagens e algoritmos clássicos; ela exige uma compreensão profunda da lógica não abeliana e o desenvolvimento de novas abstrações e ferramentas. A criação de compiladores eficientes que traduzam algoritmos quânticos de alto nível para as operações físicas específicas de uma arquitetura topológica é um campo de pesquisa ativo e essencial para a usabilidade dessas plataformas.

A convergência bem-sucedida desses avanços em hardware e software tem o potencial de desbloquear aplicações transformadoras. Na criptografia, a computação quântica topológica pode oferecer soluções robustas contra ataques quânticos. Em inteligência artificial, pode acelerar o treinamento de modelos complexos. Na simulação, pode permitir a modelagem de sistemas físicos e químicos com uma precisão sem precedentes. Assim, a integração eficaz entre a física dos materiais topológicos e as novas arquiteturas de software é o caminho fundamental para a viabilização da computação do futuro.

5. Conclusão

Em suma, esta revisão literária reforça que a programação em chips quânticos baseados em estados topológicos da matéria representa uma das rotas mais promissoras para a realização da computação do futuro, capaz de superar as limitações fundamentais dos sistemas clássicos. A estabilidade intrínseca dos qubits topológicos, derivada da proteção topológica, oferece uma vantagem significativa em termos de tolerância a falhas e resistência à decoerência, aspectos cruciais para a escalabilidade e confiabilidade dos computadores quânticos.

Apesar dos avanços experimentais notáveis que validam a base física dessa abordagem, a transição para sistemas práticos e escaláveis enfrenta desafios técnicos e de engenharia consideráveis, particularmente na síntese e manipulação de materiais

topológicos e na construção de hardware quântico complexo. Paralelamente, o desenvolvimento de um ecossistema de software compatível, incluindo linguagens de programação, algoritmos e ferramentas de compilação adaptadas à lógica não abeliana, é igualmente essencial e requer atenção contínua da comunidade de pesquisa.

A viabilização da computação quântica topológica em larga escala dependerá intrinsecamente da integração bem-sucedida entre as inovações em hardware e software. O potencial impacto dessa tecnologia em áreas estratégicas como criptografia, inteligência artificial e simulação de sistemas complexos é imenso, indicando uma transformação significativa no cenário tecnológico e científico nas próximas décadas. Portanto, o estudo aprofundado e a colaboração entre as áreas de física da matéria condensada, ciência da computação e engenharia são fundamentais para pavimentar os caminhos para a computação do futuro baseada em princípios quânticos e topológicos. Pesquisas futuras devem focar na superação dos desafios de escalabilidade do hardware e no desenvolvimento de ferramentas de software mais eficientes e acessíveis para explorar plenamente o poder computacional dos qubits topológicos.

6. Referências

1. MOURIK, V.; ZUO, K.; FROLLOV, S. M.; PLISSARD, S. R.; BAKKER, M.; KWAN, E. P. A.; KOUWENHOVEN, L. P. Signatures of Majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices. *Science*, v. 336, n. 6084, p. 1003-1007, 2012. DOI: [Signatures of Majorana Fermions in Hybrid Superconductor-Semiconductor Nanowire Devices | Science](#). Acesso em: 12 maio 2025.
2. ONODY, Roberto N. Tendo como base os qubits – eis o Computador Quântico. Portal IFSC. Disponível em: Tendo como base os qubits – eis o Computador Quântico. Acesso em: 12 maio 2025.
3. SWAN, M.; DOS SANTOS, R. P.; WITTE, F. Quantum matter overview. *J*, v. 5, n. 2, p. 232–254, 2022. Disponível em: (PDF) Quantum Matter Overview. Acesso em: 12 maio 2025.
4. INTRODUÇÃO À PROGRAMAÇÃO QUÂNTICA. [s.d.]. Disponível em: [www.scielo.br](#). Acesso em: 19 maio 2025.
5. O COMPUTADOR QUÂNTICO DA IBM E O IBM QUANTUM EXPERIENCE. [s.d.]. Disponível em: [www.scielo.br](#). Acesso em: 19 maio 2025.
6. INTRODUÇÃO À PROGRAMAÇÃO QUÂNTICA. [s.d.]. Disponível em: [www.scielo.br](#). Acesso em: 19 maio 2025.

7. O COMPUTADOR QUÂNTICO DA IBM E O IBM QUANTUM EXPERIENCE. [s.d.]. Disponível em: www.scielo.br. Acesso em: 19 maio 2025.

8. INTRODUÇÃO À PROGRAMAÇÃO QUÂNTICA. [s.d.]. Disponível em: www.scielo.br. Acesso em: 19 maio 2025.

9 .O COMPUTADOR QUÂNTICO DA IBM E O IBM QUANTUM EXPERIENCE. [s.d.]. Disponível em:
www.scielo.br. Acesso em: 19 maio 2025.