

DESAFIOS DA COMPUTAÇÃO QUÂNTICA: EXPLORANDO A DECOERÊNCIA ATRAVÉS DAS LENTES DO ALGORITMO DE SHOR



<https://doi.org/10.56238/arev6n4-423>

Data de submissão: 26/11/2024

Data de publicação: 26/12/2024

António César Galhardi

Doutoramento em Engenharia Mecânica

Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa – CPS

Mestranda em Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia de Sistemas de Produção - CPS

São Paulo, SP, Brasil

Rodrigo de Souza

E-mail: rodrigosouza.etec@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0268-9836>

LATTES: <https://lattes.cnpq.br/1942878227591083>

RESUMO

A computação quântica, com seu potencial transformador na resolução de problemas complexos, enfrenta um desafio crítico: o acoplamento com o ambiente e a consequente decoerência dos sistemas quânticos. Este artigo examina o estado da arte sobre o assunto, fornecendo uma base teórica para entender como as interações ambientais afetam os algoritmos quânticos. A coerência quântica, um elemento fundamental da mecânica quântica, permite que os estados quânticos existam em superposição. No entanto, a interação com o ambiente desencadeia a decoerência, resultando na perda dessa coerência e afetando a precisão dos resultados dos algoritmos quânticos. O estudo investiga os mecanismos de acoplamento ambiental, como interações com fôtons, flutuações nos campos magnéticos e outros fatores externos. Além disso, o impacto da decoerência em algoritmos notáveis, como o algoritmo de Shor, é explorado, analisando suas implicações para a eficiência na determinação dos resultados. Estratégias contemporâneas de mitigação, incluindo técnicas de correção de erros quânticos aplicadas a esse algoritmo, também são discutidas. Os resultados destacam que a decoerência representa um obstáculo significativo para a aplicação prática da computação quântica em problemas científicos, organizacionais e sociais. Paralelamente, um conjunto promissor de ferramentas para mitigar ou evitar os efeitos da decoerência está sendo desenvolvido, avançando a viabilidade dos computadores quânticos como tecnologias aplicáveis.

Palavras-chave: Acoplamento com o Ambiente. Decoerência quântica. Algoritmo de Shor. Interações Ambientais.

1 INTRODUÇÃO

A computação quântica, com seu potencial transformador para resolver problemas altamente complexos, tem atraído cada vez mais atenção acadêmica e investimentos significativos nos últimos anos [1]. Algoritmos quânticos, como o algoritmo de Shor, projetado para fatoração de inteiros, destacam-se por sua capacidade de superar a eficiência de algoritmos clássicos equivalentes [2]. No entanto, sua aplicação prática está intimamente relacionada a um desafio fundamental: a preservação da coerência quântica.

A coerência quântica, que permite que os estados quânticos coexistam em superposição, é um dos pilares que dão à computação quântica seu enorme poder de processamento [3]. No entanto, essa propriedade é extremamente sensível às interações com o ambiente, o que pode desencadear um fenômeno conhecido como decoerência. Essa perda gradual de coerência quântica compromete o desempenho dos algoritmos, reduzindo sua eficácia.

A decoerência constitui um dos maiores desafios para a computação quântica, pois introduz incertezas e erros significativos que dificultam a obtenção de resultados confiáveis [4]. Quando os qubits - as unidades fundamentais da computação quântica - interagem com o ambiente, caracterizado por partículas como fôtons, a coerência quântica é progressivamente degradada [5]. Essa deterioração enfraquece a superposição e as interferências que tornam os algoritmos quânticos tão eficazes, reduzindo a previsibilidade e a utilidade de seus resultados.

Além de limitar o desempenho, a decoerência impõe barreiras práticas à implementação de sistemas quânticos, exigindo estratégias avançadas de correção de erros e controle ambiental [6]. Compreender e mitigar esse fenômeno é crucial para desbloquear o potencial da computação quântica em aplicações científicas, industriais e sociais.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho busca, por meio de uma revisão bibliográfica do estado da arte, investigar a decoerência causada pelo acoplamento com o ambiente, com ênfase em suas implicações para o desempenho do algoritmo de Shor. O objetivo é explorar estratégias de mitigação para esse fenômeno, dado o aumento do uso de computadores quânticos e a escassez de estudos focados especificamente na interação entre decoerência e algoritmos quânticos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No contexto da mecânica quântica, o acoplamento com o ambiente refere-se à interação entre um sistema quântico e seus arredores, que podem incluir partículas, campos eletromagnéticos e outros

fatores ambientais. Essa interação é inerente à natureza dos sistemas quânticos e exerce uma influência significativa em seu comportamento. Na escala subatômica, o acoplamento com o ambiente resulta na troca de energia, momento e outras propriedades entre o sistema quântico e as partículas ao seu redor. Exemplos típicos incluem a emissão ou absorção de fótons, colisões com átomos ou elétrons circundantes e interações com flutuações nos campos magnéticos. Essa interação sutil é a principal causa da decoerência, que corresponde à perda progressiva de coerência quântica em sistemas quânticos [7]. A decoerência pode ser desencadeada por diferentes fenômenos interacionais fundamentais, incluindo:

- Interações com fótons: Quando um qubit em um estado de superposição interage com fótons circundantes, pode ocorrer uma medição descontrolada que colapsa o estado quântico, comprometendo sua coerência. Essa perturbação geralmente resulta do espalhamento ou absorção de fótons, levando à perda de informação quântica [8].
- Flutuações nos campos magnéticos: Variações nos campos magnéticos ambientais afetam sistemas quânticos sensíveis, como aqueles usados em experimentos de ressonância magnética nuclear ou sistemas de spin. Essas flutuações descontroladas podem introduzir erros quânticos e acelerar a decoerência [9].
- Colisões com partículas ambientais: Partículas como átomos neutros ou elétrons livres podem colidir com sistemas quânticos, alterando suas fases e levando à perda gradual de coerência. Essas colisões aleatórias reduzem a estabilidade dos estados quânticos [10]. No caso do algoritmo de Shor, reconhecido por sua eficiência em fatorar grandes inteiros, a decoerência é um obstáculo considerável. O algoritmo usa coerência quântica para realizar transformações complexas em estados sobrepostos, que são essenciais para identificar fatores primos. No entanto, a decoerência, ao introduzir erros e causar o colapso dos estados quânticos, compromete a precisão e a eficácia do algoritmo, resultando em possíveis erros nos resultados [11].

2.1 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO

A mitigação da decoerência depende das características específicas de cada algoritmo e das condições de implementação. Assim, estratégias adaptadas são essenciais para atender às particularidades de diferentes algoritmos quânticos [12]. Três fatores principais justificam essa abordagem personalizada:

- Requisitos algorítmicos: cada algoritmo quântico tem necessidades específicas. Por exemplo, o algoritmo de Shor requer manipulações destinadas a fatorar números inteiros, enquanto o

algoritmo de Grover é projetado para pesquisas em bancos de dados não estruturados. Essas diferenças exigem estratégias de mitigação personalizadas [13].

- Complexidade e sensibilidade: A sensibilidade de um algoritmo à decoerência varia de acordo com sua complexidade. Algoritmos que são naturalmente mais robustos podem ser menos afetados, enquanto os mais sensíveis requerem medidas de correção mais avançadas [14].
- Arquitetura e implementação: A configuração do hardware quântico e as condições ambientais nas quais os algoritmos são executados influenciam diretamente as estratégias de mitigação. Características específicas do ambiente operacional, como temperatura e nível de isolamento, também devem ser consideradas [15].

Embora existam técnicas amplas, como o uso de códigos de correção de erros quânticos e controles adaptativos, a customização é essencial para otimizar os resultados em aplicações práticas. Estratégias personalizadas maximizam o desempenho em cenários específicos, garantindo maior precisão e eficiência no combate aos efeitos da decoerência.

2.2 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO PARA O ALGORITMO DE SHOR

As estratégias de mitigação de decoerência no algoritmo de Shor se concentram em preservar a coerência quântica e minimizar os erros introduzidos pela interação com o ambiente durante a fatoração de inteiros. Entre as principais abordagens estão Códigos de Correção de Erros Quânticos e Técnicas de Controle de Decoerência Adaptativa [16].

2.2.1 Códigos de correção de erros quânticos

Esses códigos introduzem redundância na informação quântica para detectar e corrigir erros causados pela decoerência. Entre os mais relevantes estão:

- Códigos Steane: Desenvolvidos por Andrew Steane na década de 1990, eles são baseados no emaranhamento de qubits para proteger as informações quânticas contra erros. Eles usam qubits redundantes, chamados de "qubits de código", para codificar informações para que, mesmo com a perturbação de um ou mais qubits, os erros possam ser detectados e corrigidos. O processo envolve medições de paridade que identificam desvios, permitindo que operações corretivas sejam aplicadas e a coerência quântica seja restaurada [17].
- Códigos de superfície: Com base em princípios topológicos, eles são particularmente eficazes na correção de erros em arquiteturas quânticas com qubits topologicamente protegidos. Esses códigos usam grades bidimensionais de qubits em que os dados são distribuídos ao longo das

bordas. A estrutura topológica facilita a identificação de erros por meio de medições específicas, permitindo correções eficientes e aumentando a resistência à decoerência [18].

2.2.2 Técnicas de controle de decoerência adaptativa

Essas técnicas ajustam dinamicamente as operações quânticas com base nas condições ambientais em tempo real. Esses incluem:

- Monitoramento em tempo real: Consiste na medição contínua de parâmetros relevantes, como taxas de erro quântico e intensidade de decoerência. Esta informação é crucial para entender o estado do sistema quântico [19].
- Algoritmos de aprendizado de máquina quântico: usados para analisar dados coletados em tempo real, eles aprendem padrões e identificam características de decoerência. Esta análise permite prever e reagir de forma eficiente às mudanças nas condições do sistema [20].
- Estratégias de controle ideais: Com base nas análises realizadas, eles determinam ajustes específicos nas operações quânticas para minimizar os impactos da decoerência e preservar a coerência do sistema [21].
- Feedback em tempo real: Integra as etapas anteriores, permitindo ajustes imediatos em resposta à decoerência detectada. Este processo contínuo garante maior estabilidade durante a execução do algoritmo [22]. Monitoramento Contínuo e Resiliência Ambiental

Além das abordagens mencionadas, o monitoramento contínuo desempenha um papel essencial na adaptação do sistema quântico às mudanças dinâmicas no ambiente, como flutuações de temperatura, campos magnéticos e interferência eletromagnética. Esse monitoramento permite ajustes precisos em tempo real, garantindo a estabilidade dos qubits e minimizando os efeitos adversos da decoerência.

2.2.3 Integração de estratégias

A combinação de códigos de correção de erros, técnicas adaptativas e monitoramento contínuo tem se mostrado indispensável para aumentar a robustez do algoritmo de Shor em cenários práticos. Essa integração não apenas melhora a confiabilidade do algoritmo em sistemas sujeitos a decoerência, mas também promove avanços na computação quântica, abordando os desafios da interação ambiental.

3 MÉTODO

A pesquisa adota uma abordagem de revisão de literatura, analisando publicações acadêmicas, livros e artigos recentes ou canônicos sobre computação quântica, coerência e decoerência quântica. A seleção priorizou trabalhos publicados em periódicos de alta relevância e conferências especializadas nas áreas de física quântica e ciência da computação.

O estudo se concentra na identificação dos principais mecanismos de acoplamento com o ambiente, incluindo interações com partículas subatômicas e flutuações de campos externos, bem como as estratégias mais promissoras para mitigar os efeitos da decoerência. Estudos de caso sobre a aplicação do algoritmo de Shor também foram avaliados, fornecendo uma análise detalhada do impacto da decoerência em sua eficiência e precisão.

A síntese das contribuições visa oferecer uma visão integrada dos desafios e soluções para a computação quântica, com implicações diretas para a viabilidade prática dessa tecnologia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa destacou a decoerência quântica, resultante do acoplamento com o ambiente, como um dos principais desafios para a implementação eficiente de algoritmos quânticos, incluindo o algoritmo de Shor. Fatores como fótons, flutuações nos campos magnéticos e colisões com partículas promovem a perda progressiva da coerência quântica, comprometendo a precisão dos resultados. A literatura mostra que esse acoplamento induz medições descontroladas e distúrbios nas fases quânticas de estados sobrepostos, resultando em erros quânticos que podem inviabilizar a correta execução do algoritmo.

No caso específico do algoritmo de Shor, a decoerência impacta diretamente nas transformações quânticas responsáveis pela fatoração de inteiros, prejudicando o processo de identificação de fatores primos. A eficiência do algoritmo está, portanto, diretamente relacionada à capacidade de preservar a coerência quântica ao longo das operações, o que reforça a importância de estratégias robustas para controlar e mitigar a decoerência.

Dentre as estratégias de mitigação analisadas, destacam-se técnicas de correção de erros quânticos, como códigos de superfície e concatenados, que têm se mostrado eficazes na detecção e correção de erros sem destruir informações quânticas. Esses métodos permitem que o estado sobreposto do sistema seja prolongado, garantindo maior estabilidade durante a execução do algoritmo. Além disso, técnicas de controle adaptativo e desacoplamento dinâmico foram exploradas como soluções viáveis para minimizar os efeitos da decoerência, ajustando dinamicamente as interações com o ambiente.

Apesar dos avanços, a implementação prática dessas estratégias enfrenta desafios significativos, especialmente em termos de escalabilidade e robustez em grandes sistemas quânticos. Assim, embora as estratégias de mitigação representem um claro progresso, o desenvolvimento de arquiteturas quânticas mais resilientes e soluções inovadoras de correção de erros continua sendo essencial para permitir a aplicação prática de algoritmos como o de Shor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A decoerência quântica constitui um obstáculo crucial para a implementação do algoritmo de Shor e, por extensão, para a evolução da computação quântica. Ao comprometer a coerência quântica, a decoerência reduz a eficácia do algoritmo e ameaça sua capacidade de realizar fatoração de inteiros eficiente. No entanto, estratégias de mitigação, como códigos de correção de erros, controle adaptativo e monitoramento contínuo, mostraram grande potencial para enfrentar esse desafio.

Os progressos na atenuação da decoerência reforçam a necessidade permanente de melhorar as estratégias existentes e desenvolver novas abordagens. À medida que a computação quântica se aproxima de aplicações práticas, a pesquisa focada no refinamento dessas técnicas é essencial para garantir a robustez e a confiabilidade dos sistemas quânticos em cenários do mundo real.

Além disso, enfrentar esse problema requer inovação constante. Estudos futuros podem explorar novas soluções, considerando as especificidades dos sistemas quânticos emergentes. A colaboração interdisciplinar entre físicos, engenheiros e cientistas da computação será essencial para superar os desafios impostos pela decoerência, promovendo avanços significativos no campo.

Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias e metodologias que mitiguem a decoerência permitirá não apenas todo o potencial do algoritmo de Shor, mas também a consolidação da computação quântica como uma ferramenta revolucionária no campo da tecnologia.

REFERÊNCIAS

CARDOSO, A.S.; FERRARI, P.A.; ALMEIDA, N.G., Potencialidades da computação quântica problematizada para discutir Ciência, Tecnologia e Sociedade. Experiências em Ensino de Ciências, v. 14, n. 2, p. 49-70, 2019.

PASQUALE, R.P.; BIANCHINI, C.P. Um estudo exploratório das falhas de segurança de algoritmos de criptografia na era da computação quântica. In: XVI Jornada de Iniciação Científica e X Mostra de Iniciação Tecnológica-2020. 2020.

MACHADO, P.D. Coerência quântica de estados de fenda: preparação e caracterização parcial de estados bipartidos assimétricos. Universidade Federal de Minas Gerais – Tese de Doutorado, Belo Horizonte, 2020.

SCHLOSSHAUER, M. Quantum decoherence. Physics Reports, v. 831, p. 1-57, 2019.

WOJCIECH, Z.H. Environment-induced decoherence and the transition from quantum to classical. Vistas in Astronomy, Volume 37, Pages 185-196., 1993.

KERKER, N.; RÖPKE, R.; STEINERT, L.M.; POOCHE, A.; STIBOR, A. Quantum decoherence by Coulomb interaction. New Journal of Physics, v. 22, n. 6, p. 063039, 2020.

STÁREK, R.; MIČUDA, M.; STRAKA, I.; NOVÁKOVÁ, M.; DUŠEK, M.; JEŽEK, M.; FILIP, R. Experimental quantum decoherence control by dark states of the environment. New Journal of Physics, v. 22, n. 9, p. 093058, 2020.

CARDOSO, A.C. Simulation of quantum jump in qutrit photonic path system. Universidade Federal de Minas Gerais – Tese de Doutorado, Belo Horizonte, 2021.

MOHAMED, A.B.A.; KHEDR, A.N.; HADDADI, S.; RAHMAN, A.U.; TAMMAM, M.; POURKARIMI, M.R. Intrinsic decoherence effects on nonclassical correlations in a symmetric spin-orbit model. Results in Physics, v. 39, p. 105693, 2022.

MILLEN, J.; STICKLER, B.A. Quantum experiments with microscale particles. Contemporary Physics, v. 61, n. 3, p. 155-168, 2020.

MOODY, G.; CHANG, L.; STEINER, T.J.; BOWERS, J.E. Chip-scale nonlinear photonics for quantum light generation. AVS Quantum Science, v. 2, n. 4, 2020.

PASSARELLI, G.; YIP, K.W.; LIDAR, D.A.; LUCIGNANO, P. Standard quantum annealing outperforms adiabatic reverse annealing with decoherence. Physical Review, v. 105, n. 3, p. 032431, 2022.

KHATRI, Sumeet et al. Mitigating noise in variational quantum algorithms. *Physical Review A*, v. 98, n. 5, 052334, 2018

VOLYA, D.; ZHANG, T.; ALAM, N.; TEHRANIPOOR, M.; MISHRA, P. Towards secure classical-quantum systems. In: IEEE International Symposium on Hardware Oriented Security and Trust (HOST), p. 283-292., 2023.

RAVI, G.S.; SMITH, K.N.; GOKHALE, P.; MARI, A.; EARNEST, N.; JAVADI-ABHARI, A.; CHONG, F.T. Vaqem: A variational approach to quantum error mitigation. In: IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture (HPCA), p. 288-303., 2022.

CEREZO, M.; ARRASIMITH, A.; BABBUSH, R.; BENJAMIN, S.C.; ENDO, S.; FUJII, K.; COLES, P.J. Variational quantum algorithms. *Nature Reviews Physics*, v. 3, n. 9, p. 625-644, 2021.

TREMBLAY, M.A.; DELFOSSE, N.; BEVERLAND, M.E. Constant-overhead quantum error correction with thin planar connectivity. *Physical Review Letters*, v. 129, n. 5, p. 050504, 2022.

KRINNER, S.; LACROIX, N.; REMM, A.; DI PAOLO, A.; GENOIS, E.; LEROUX, C.; WALLRAFF, A. Realizing repeated quantum error correction in a distance-three surface code. *Nature*, v. 605, n. 7911, p. 669-674, 2022.

AL-MOAHMED, A.H. Quantum radar: a brief analytical study. In: 16th International Computer Engineering Conference (ICENCO). IEEE, p. 174-180, 2020.

ZHANG, Y.; QIANG, N. Recent advances in quantum machine learning. *Quantum Engineering*, v. 2, n. 1, p. e34, 2020.

KOCH, C.P.; BOSCAIN, U.; CALARCO, T.; DIRR, G.; FILIPP, S.; GLASER, S.J.; WILHELM, F.K. Quantum optimal control in quantum technologies. Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe. *EPJ Quantum Technology*, v. 9, n. 1, p. 19, 2022.

MAGRINI, L.; ROSENZWEIG, P.; BACH, C.; DEUTSCHMANN-OLEK, A.; HOFER, S.G.; HONG, S.; ASPELMAYER, M. Real-time optimal quantum control of mechanical motion at room temperature. *Nature*, v. 595, n. 7867, p. 373-377, 2021.