



códigos estabilizadores na engenharia quântica moderna e a transformação de hardwares quânticos instáveis em sistemas viáveis

dedicatória

Este trabalho é dedicado, com profundo respeito e admiração, ao engenheiro João Antonio Zuffo, nascido em 28 de maio de 1939, em São Paulo, reconhecido como pioneiro e referência internacional no desenvolvimento da microeletrônica e dos circuitos integrados. Professor Titular Emérito da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP), João Antonio Zuffo foi responsável pelo projeto e construção do primeiro circuito integrado brasileiro em 1971 e fundador do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Poli em 1975, iniciativas que marcaram profundamente o avanço tecnológico e industrial do Brasil.

Seu legado transcende as realizações técnicas, manifestando-se também na excelência acadêmica e na formação de gerações de engenheiros e cientistas. Entre os frutos mais notáveis desse legado está seu filho, o professor Marcelo Knörich Zuffo, que continua a tradição familiar de inovação e excelência técnica, liderando pesquisas avançadas em tecnologias emergentes como realidade virtual, realidade aumentada, inteligência artificial e sistemas computacionais avançados.

Esta dedicatória celebra o impacto duradouro de João Antonio Zuffo e o reconhecimento de que seu pioneirismo e dedicação continuam a inspirar e impulsionar o desenvolvimento científico e tecnológico no Brasil e no mundo.

sobre o autor

Marcos Eduardo Elias é um matemático, engenheiro e cientista da computação brasileiro, com atuação no campo da computação quântica, inteligência artificial e finanças quantitativas. Ele é fundador das empresas Holosystems e Equiverse, especializadas no desenvolvimento de algoritmos quânticos e sistemas de inteligência artificial não antropocêntrica com aplicações em áreas como mercado financeiro, medicina, veterinária e agroindústria.



Possui formação acadêmica, com dois PhDs em Matemática e um em Ciências da Computação. Marcos Elias utiliza-se de abordagens interdisciplinares que combinam teoria avançada de sistemas complexos, lógica fuzzy, modelos estocásticos e algoritmos variacionais quânticos.

Atualmente, seu foco principal está na pesquisa e desenvolvimento de soluções práticas e inovadoras que integram algoritmos avançados, especialmente na área de correção de erros quânticos, e busca transformar a computação quântica em uma realidade tecnológica viável e escalável.

Marcos Elias também é engajado na formação avançada de profissionais nas áreas de trading, modelagem financeira e computação quântica, e mantém parcerias estratégicas e colaborações acadêmicas e empresariais com instituições de renome no Brasil e no exterior, incluindo universidades e centros de pesquisa como a Universidade de São Paulo (USP) e o Massachusetts Institute of Technology (MIT), onde interage regularmente com especialistas em física aplicada e engenharia quântica.

abstract

Este trabalho visa apresentar uma discussão aprofundada e detalhada sobre o papel fundamental e essencial que os algoritmos de correção de erros desempenham no desenvolvimento prático e viabilização do hardware quântico contemporâneo, particularmente em contextos onde a instabilidade inerente dos dispositivos representa um grande desafio. Diferentemente das abordagens clássicas, nas quais algoritmos eram frequentemente vistos como recursos complementares ou periféricos, na computação quântica moderna, algoritmos tornaram-se elementos essenciais que definem diretamente as possibilidades e limites operacionais do hardware.

Inicialmente, são introduzidos os fundamentos teóricos da correção de erros quânticos, destacando desde estratégias pioneiras, como os códigos de bit flip e phase flip de três qubits, até o seminal código de Shor. Essas técnicas pioneiras ilustram claramente os desafios únicos da informação quântica, como a não clonagem, a natureza contínua dos erros quânticos e o caráter destrutivo das medições, demonstrando como algoritmos cuidadosamente projetados podem superar essas dificuldades fundamentais.

Em seguida, é discutida detalhadamente a teoria geral da correção de erros quânticos, que fornece critérios matemáticos rigorosos para projetar códigos eficazes capazes de restaurar coerentemente estados quânticos



perturbados. Destaca-se o uso extensivo dos formalismos estabilizadores e dos códigos CSS (Calderbank-Shor-Steane), que simplificam a operação e a implementação prática desses algoritmos.

Este trabalho também ilustra com exemplos práticos e detalhados, a partir de iniciativas internacionais importantes, como algoritmos de correção de erros foram implementados experimentalmente com sucesso. Destacam-se particularmente três avanços seminais recentes:

A colaboração entre Google Quantum AI e a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara (2012-2015), liderada por John Martinis, que implementou o código de superfície em qubits supercondutores tipo transmon, demonstrando melhorias significativas na fidelidade operacional dos dispositivos, abrindo caminho para arquiteturas quânticas escaláveis e mais estáveis.

A colaboração entre IBM Quantum, ETH Zurich e a Universidade Técnica de Delft (2021), que demonstrou experimentalmente uma redução substancial nas taxas de erro operacional e aumento expressivo na fidelidade dos qubits através da implementação rigorosa do código de superfície, resultando em aumentos de até 100 vezes no tempo de coerência efetivo.

A pesquisa pioneira da equipe do Google Quantum AI (dezembro de 2024), publicada na Nature, intitulada "Quantum error correction below the surface code threshold", em que o uso de códigos de superfície com distâncias maiores, combinado com algoritmos sofisticados de decodificação em tempo real, resultou numa taxa de erro lógica historicamente baixa (0,143%) e demonstrou um desempenho superior dos qubits lógicos sobre os qubits físicos individuais.

Adicionalmente, uma recente colaboração entre Microsoft e Quantinuum (abril de 2024) introduziu a virtualização inovadora de qubits, usando técnicas avançadas de extração ativa de síndromes para criar qubits lógicos eficazes com uma redução drástica no número necessário de qubits físicos. Este exemplo comprova claramente como algoritmos de correção de erros são essenciais não apenas para estabilizar dispositivos existentes, mas também para tornar economicamente viável e tecnicamente acessível a implementação prática da computação quântica em larga escala.

Assim, os avanços descritos demonstram inequivocamente que, na computação quântica contemporânea, os algoritmos de correção de erros deixaram de ser acessórios secundários para se tornarem componentes críticos e



definidores do desempenho do hardware. Esse novo paradigma reforça a necessidade de uma abordagem interdisciplinar, integrando profundamente teoria algorítmica e engenharia de hardware, para garantir o desenvolvimento sustentável e eficaz dos futuros sistemas computacionais quânticos.

1. introdução

A correção de erros quânticos representa um alicerce teórico e prático fundamental no campo da computação quântica, sendo a base de arquiteturas robustas para computação quântica confiável. A fragilidade intrínseca dos estados quânticos, devido à decoerência e imperfeições operacionais, exige uma estrutura matemática robusta capaz de corrigir erros sem observar diretamente o estado. As complexas teorias matemáticas e métodos computacionais rigorosos desenvolvidos para correção de erros quânticos sustentam o avanço em direção à computação quântica tolerante a falhas.

O início da correção de erros quânticos é exemplificado por esquemas elementares, como os códigos de bit flip e phase flip de três qubits. O código bit flip de três qubits codifica um único qubit lógico em três qubits físicos, permitindo identificar e corrigir um erro de bit-flip por meio de votação majoritária sem medir diretamente a informação quântica. Da mesma forma, o código phase flip de três qubits aborda erros na fase do estado quântico. Esses códigos introdutórios destacam os recursos essenciais e a complexidade inicial associada à correção de erros quânticos, abrindo caminho para esquemas mais sofisticados.

Avançando além dos esquemas básicos, o código de Shor surge como um código de correção de erros quânticos seminal, capaz de lidar com erros arbitrários em um único qubit, representando um avanço significativo na computação quântica. O código de Shor combina intrincadamente proteções contra bit-flip e phase-flip, codificando um qubit lógico em nove qubits físicos. Seu projeto demonstra profundamente a viabilidade de uma correção abrangente de erros dentro da mecânica quântica, influenciando significativamente os desenvolvimentos subsequentes na teoria de codificação quântica.

As bases teóricas da correção de erros quânticos repousam na discretização dos erros, modelos de erros independentes, degenerescência dos códigos e limites análogos aos códigos clássicos de correção de erros. A discretização encapsula o ruído quântico em um conjunto finito e gerenciável de erros—tipicamente os operadores de Pauli (X, Y, Z). Modelos de erros independentes



simplificam os tratamentos analíticos, assumindo que erros de qubit ocorrem independentemente com baixas probabilidades. Códigos quânticos exibem singularmente degenerescência, onde erros quânticos distintos podem ter resultados idênticos no subespaço codificado, distinguindo códigos quânticos dos clássicos. O limite de Hamming quântico estabelece matematicamente restrições sobre eficiência e limitações dos códigos quânticos, fornecendo uma referência essencial para avaliação do desempenho dos códigos.

Códigos de correção de erros quânticos frequentemente são construídos aproveitando códigos lineares clássicos e incorporando princípios quânticos. Códigos lineares clássicos, baseados em estruturas algébricas e combinatórias, formam o modelo para análogos quânticos. Os códigos Calderbank–Shor–Steane (CSS) exemplificam essa sinergia, derivando códigos quânticos a partir de pares de códigos lineares clássicos com condições específicas de ortogonalidade. Os códigos CSS simplificam notavelmente a correção de erros quânticos ao separar claramente erros de bit-flip e phase-flip, proporcionando estratégias eficientes de codificação e decodificação profundamente enraizadas na teoria de códigos clássicos.

No cerne da correção avançada de erros quânticos está o formalismo dos estabilizadores—uma poderosa ferramenta algébrica que generaliza elegantemente o framework CSS. Os códigos estabilizadores são definidos por um conjunto de operadores comutativos (estabilizadores) cujo autoespaço simultâneo define o espaço do código. Esses estabilizadores fornecem procedimentos sucintos e práticos de detecção de erros sem perturbar a informação quântica codificada. Crucialmente, o formalismo estabilizador se integra perfeitamente com operações de portões unitários e protocolos de medição, estabelecendo uma base teórica coesa para protocolos de correção de erros.

O teorema de Gottesman–Knill oferece um importante insight computacional dentro da teoria dos estabilizadores, afirmando que computações quânticas limitadas a operações de Clifford e medições de estabilizadores podem ser simuladas classicamente com eficiência polinomial. Este resultado estabelece limites computacionais fundamentais e oportunidades práticas, enfatizando operações específicas de portas favoráveis à computação quântica tolerante a falhas.

Construções explícitas e exemplos de códigos estabilizadores—como o código de cinco qubits e o código de Steane—demonstram adicionalmente praticidade e versatilidade. O código de cinco qubits, famoso por sua compacidade, efetivamente corrige erros arbitrários em um



único qubit usando apenas cinco qubits físicos. O código de Steane, um exemplo específico de códigos CSS, combina elegantemente a estrutura dos códigos clássicos com correção de erros quânticos, oferecendo proteção robusta contra erros comuns.

A computação quântica tolerante a falhas generaliza a correção de erros para abranger resiliência em todo o processo computacional. A tolerância a falhas requer esquemas abrangentes que protejam computações quânticas de erros em cascata durante operações de portas quânticas, medições e operações de memória quântica. A visão geral da tolerância a falhas enfatiza a mitigação sistemática de erros através de redundâncias, transversalidade das portas quânticas (portas aplicadas individualmente aos conjuntos de qubits sem entrelaçamento), e esquemas precisos de medição resilientes à propagação de erros isolados.

A lógica quântica tolerante a falhas garante que portas quânticas operem dentro do limiar de tolerância a falhas, empregando operações transversais e camadas adicionais de codificação para manter a integridade computacional. Medições realizadas em contexto tolerante a falhas envolvem sofisticados ciclos de realimentação corretiva para estabilizar continuamente os estados computacionais, evitando acumulação catastrófica de erros.

Finalmente, sistemas de computação quântica resilientes integram elementos de correção de erros, tolerância a falhas e estratégias coerentes de mitigação de erros em frameworks computacionais robustos e holísticos. Esses sistemas representam a vanguarda da tecnologia computacional quântica, visando realizar computadores quânticos práticos e de larga escala, capazes de resolver problemas além das capacidades computacionais clássicas. O contínuo desenvolvimento da computação quântica tolerante a falhas aproxima constantemente a computação quântica de uma possibilidade teórica a uma realidade tecnológica, transformando fundamentalmente paradigmas computacionais e descobertas científicas.

2. código bit flip de três qubits

O código bit flip de três qubits é uma estratégia pioneira na correção de erros em computação quântica, desenvolvida especificamente para combater erros de inversão de bits, que são eventos indesejados onde o estado de um qubit é alterado de seu estado original para o estado oposto. Este método está entre as primeiras demonstrações claras e fundamentais de como é possível realizar uma correção de erro quântica eficaz, respeitando os princípios rigorosos da mecânica quântica.



Inicialmente, ao considerar a proteção de estados quânticos contra ruídos, surgem desafios específicos que diferem substancialmente da teoria clássica de correção de erros. Primeiramente, destaca-se o princípio da não clonagem quântica, o qual impede que sejam criadas cópias idênticas perfeitas de estados quânticos desconhecidos. Essa limitação fundamental impede que se utilize uma simples replicação do estado quântico original como método de proteção.

Outro desafio crucial é a natureza contínua dos erros quânticos. Ao contrário dos erros clássicos, que geralmente assumem formas discretas facilmente identificáveis, erros quânticos podem manifestar-se em um espectro contínuo, tornando complexa a tarefa de detectá-los e corrigi-los precisamente.

Finalmente, um dos maiores obstáculos é o fato de que a medição em mecânica quântica tende a destruir a informação original contida no estado. Qualquer tentativa direta de detectar um erro medindo o estado quântico poderia comprometer irreversivelmente a informação codificada, exigindo abordagens alternativas engenhosas.

Contudo, o código bit flip de três qubits supera esses desafios ao empregar uma estratégia de codificação lógica robusta e simples. Neste código, o estado quântico original, representado por um único qubit lógico, é codificado em três qubits físicos. Essa abordagem cria uma redundância lógica essencial sem violar os princípios fundamentais da física quântica, especialmente o da não clonagem.

Após a codificação, os qubits são potencialmente submetidos a canais de ruído, nos quais erros do tipo bit flip podem ocorrer com uma certa probabilidade. Um aspecto importante deste método é sua capacidade de corrigir qualquer erro que ocorra em até um dos três qubits físicos envolvidos. Isso torna o código bit flip particularmente poderoso contra falhas isoladas e eficaz na preservação da integridade dos estados quânticos.

O procedimento de correção é dividido em duas etapas essenciais: detecção ou diagnóstico da síndrome e recuperação do estado original.

Na primeira etapa, conhecida como diagnóstico da síndrome, medições especiais são realizadas para identificar onde exatamente ocorreu o erro, se houver. Essas medições, cuidadosamente projetadas, revelam uma informação chamada de síndrome do erro, que indica explicitamente qual qubit sofreu o erro de bit flip. É crucial notar que essas medições não revelam nenhuma informação sobre o estado



quântico original, preservando assim sua integridade, o que constitui uma vantagem fundamental da técnica.

Uma vez diagnosticado o erro por meio da síndrome, procede-se à etapa de recuperação. Com base na síndrome detectada, aplica-se uma operação específica que desfaz o erro ocorrido, recuperando com precisão o estado quântico original. Esse método permite uma restauração eficaz do estado lógico inicial sem comprometer ou perturbar a informação quântica codificada.

Este procedimento destaca uma característica essencial da correção de erros quânticos: a capacidade de realizar correções precisas sem obter conhecimento direto ou explícito do estado quântico protegido. Essa estratégia demonstra claramente como é possível operar dentro dos limites rígidos impostos pelas leis quânticas, proporcionando um modelo conceitual poderoso e bem-sucedido.

O código bit flip de três qubits serve, portanto, como uma base conceitual fundamental para o desenvolvimento posterior de esquemas mais avançados de correção de erros, consolidando-se como uma técnica pedagógica e prática essencial no campo emergente da computação quântica. Sua eficácia simples, porém profunda, oferece um caminho sólido em direção ao objetivo maior da computação quântica tolerante a falhas, fundamental para a viabilização prática de sistemas quânticos robustos e confiáveis.

3. o código de Shor

O código de Shor representa uma inovação fundamental e decisiva na teoria de correção de erros quânticos, especialmente por sua capacidade única e abrangente de proteger estados quânticos contra uma vasta gama de erros, incluindo tanto inversões de bits (bit flip) quanto inversões de fase (phase flip). Este método foi desenvolvido justamente para lidar com um desafio central na computação quântica: preservar a coerência e a integridade da informação quântica diante dos múltiplos tipos de ruído e interferências aos quais esses estados estão sujeitos.

Para entender profundamente a relevância e a eficácia do código de Shor, é crucial considerar detalhadamente as particularidades e dificuldades da computação quântica. Primeiramente, existe o princípio da não clonagem, que impede a criação de cópias idênticas perfeitas de estados quânticos desconhecidos. Este princípio limita substancialmente as estratégias clássicas tradicionais de



redundância, exigindo abordagens alternativas para garantir a proteção dos estados quânticos.

Adicionalmente, os erros em sistemas quânticos são de natureza contínua, diferindo significativamente dos erros discretos que ocorrem em sistemas clássicos. Isso cria uma complexidade adicional na detecção precisa e na subsequente correção desses erros. Os métodos clássicos convencionais, geralmente baseados em simples identificação e correção de padrões discretos, são inadequados para lidar com essa continuidade intrínseca dos erros quânticos.

Outra grande complicação decorre do próprio ato de medir um estado quântico. A medição em mecânica quântica tem o potencial de destruir ou perturbar irreversivelmente o estado original. Assim, qualquer estratégia de correção de erros quânticos precisa obrigatoriamente evitar que a medição direta da informação codificada perturbe o estado original.

O código de Shor enfrenta essas dificuldades por meio de uma abordagem extremamente sofisticada e rigorosa, estruturada em duas etapas sequenciais e complementares de codificação. Na primeira etapa, um único qubit lógico é inicialmente codificado em três qubits físicos usando um esquema similar ao código bit flip de três qubits. Essa primeira etapa cria redundância especificamente projetada para proteger contra erros de inversão de bits. Essa redundância funciona como uma barreira eficaz contra perturbações locais que possam inverter o estado dos qubits físicos individuais.

Em seguida, na segunda etapa, cada um desses três qubits já codificados passa por uma nova codificação em três qubits adicionais, totalizando nove qubits físicos. Esta etapa adicional é especialmente projetada para proteger contra erros de inversão de fase. Erros de fase são sutis e podem ocorrer mesmo quando o estado do qubit permanece o mesmo em termos da base computacional "zero" ou "um"; eles afetam a fase relativa entre estados em superposição, uma característica vital e delicada da informação quântica.

A combinação dessas duas etapas sequenciais forma uma estrutura altamente robusta que permite identificar e corrigir eficientemente tanto inversões de bits quanto inversões de fase, independentemente do erro específico que tenha ocorrido em qualquer um dos nove qubits físicos.

Após a codificação, os nove qubits são expostos ao canal de ruído, onde erros de vários tipos podem ocorrer. Graças à sofisticada estrutura do código de Shor, torna-se possível detectar com precisão qual tipo de erro ocorreu e



em qual qubit específico ele ocorreu. Isso é feito por meio de medições indiretas, conhecidas como diagnóstico de síndrome, projetadas para revelar apenas a localização e o tipo do erro, sem fornecer nenhuma informação sobre o estado quântico lógico original, preservando, portanto, sua integridade.

Essas medições diagnósticas fornecem uma "assinatura" clara do erro—uma informação suficiente e precisa para orientar a próxima etapa de recuperação. Nesta fase, utiliza-se a informação da síndrome para realizar operações corretivas específicas que anulam os efeitos do erro ocorrido, restaurando com alta fidelidade o estado quântico original. É importante notar que esse processo mantém a coerência do estado lógico, algo absolutamente essencial para a computação quântica.

Uma característica crucial e revolucionária do código de Shor é sua habilidade singular de realizar todas essas correções sem nunca perturbar diretamente o estado lógico original. Este aspecto é essencial devido ao princípio da medição destrutiva em mecânica quântica, e demonstra como é possível realizar operações sofisticadas de recuperação de estados sem violar as leis fundamentais da física quântica.

O código de Shor, portanto, representa um marco histórico e conceitual na computação quântica, demonstrando explicitamente como desafios aparentemente intransponíveis podem ser superados através de estratégias engenhosas e rigorosas de codificação e proteção. Sua robustez e eficácia abriram o caminho para o desenvolvimento de códigos estabilizadores ainda mais avançados e complexos, como os códigos CSS, essenciais para realizar computação quântica escalável e efetivamente tolerante a falhas.

Dessa forma, o legado duradouro do código de Shor é sua contribuição decisiva para transformar a computação quântica de um conceito teórico em uma realidade prática viável, estabelecendo as bases para avanços futuros no desenvolvimento de sistemas quânticos complexos, confiáveis e tecnologicamente viáveis.

4. teoria geral da correção de erros quânticos

A correção de erros quânticos representa um avanço crucial na busca pela viabilidade prática da computação quântica, considerando a extrema fragilidade dos estados quânticos frente a perturbações ambientais e ruídos intrínsecos aos sistemas físicos. Uma teoria geral da correção de erros quânticos busca estabelecer princípios universais e



condições rigorosas pelas quais se pode proteger e restaurar estados quânticos a despeito dessas perturbações inevitáveis.

A ideia fundamental da correção de erros quânticos envolve a codificação dos estados quânticos em subespaços especialmente estruturados dentro de um espaço de Hilbert ampliado. Estes subespaços, conhecidos como códigos quânticos, são definidos como espaços menores cuidadosamente projetados para serem subespaços protegidos. Um aspecto chave da teoria geral de correção de erros é a introdução de um projetor especial, que atua explicitamente sobre o espaço codificado, distinguindo-o claramente dos demais subespaços possíveis, os quais são vulneráveis ao ruído. Assim, quando um estado codificado sofre algum tipo de erro, ele migra para subespaços distintos e deformados do espaço original. A correção de erro envolve trazer de volta o estado perturbado ao subespaço protegido original, restaurando sua integridade informacional e coerência quântica.

Uma característica essencial dessa teoria geral é a descrição rigorosa e universal dos processos de ruído por meio de operadores específicos chamados elementos de operação. Esses elementos descrevem as perturbações sofridas pelos estados quânticos durante a evolução em ambientes ruidosos. Dentro dessa estrutura geral, um conjunto fundamental de condições matemáticas precisa ser satisfeito para garantir que erros específicos possam ser perfeitamente corrigidos por um código quântico dado. Essas condições, conhecidas como condições gerais de correção de erros quânticos, determinam se e como é possível recuperar o estado original após perturbações arbitrárias.

Essas condições gerais podem ser resumidas da seguinte forma: ao considerar um conjunto de operadores que representam erros específicos atuando sobre estados quânticos codificados, é necessário e suficiente que esses operadores, quando restritos ao subespaço protegido do código, resultem em transformações que preservem integralmente as relações internas (como sobreposições e fases relativas) dos estados originais dentro do subespaço protegido. Em outras palavras, o efeito de qualquer erro permitido, quando projetado dentro do espaço protegido, deve poder ser descrito por uma combinação linear de transformações unitárias simples que não destroem a estrutura interna original dos estados codificados.

Um avanço conceitual significativo dessa teoria geral é a demonstração de que, embora erros quânticos possam ser contínuos e variados, é possível discretizá-los. Isso significa que qualquer operação de erro que afete um único



qubit pode ser descrita de maneira suficiente por um conjunto finito e específico de operadores conhecidos como operadores de Pauli (identidade, X, Y e Z). Este resultado fundamental implica que, ao se projetar códigos quânticos, é suficiente garantir a proteção contra esses operadores discretos básicos. A consequência prática é que, apesar da aparente complexidade contínua dos erros quânticos, basta proteger o sistema contra um número finito e relativamente pequeno de erros específicos para garantir uma proteção abrangente contra perturbações arbitrárias.

Uma técnica particularmente poderosa, derivada dessa teoria geral, é a correção de erros sem medições diretas dos estados quânticos originais. Tal abordagem utiliza sistemas auxiliares, chamados ancillas, preparados em estados conhecidos e padronizados. Por meio de operações unitárias condicionais envolvendo tanto os estados codificados quanto esses ancillas, é possível realizar medições indiretas dos erros (medição da síndrome) sem perturbar o estado original codificado. Esse método sofisticado permite determinar precisamente o tipo e a localização do erro ocorrido.

A medição indireta da síndrome é seguida por uma etapa de recuperação, onde operações corretivas apropriadas são aplicadas baseando-se exclusivamente na informação obtida das medições indiretas. Essa recuperação restaura fielmente o estado original codificado sem comprometer a coerência quântica.

Finalmente, o valor profundo e prático dessa teoria geral reside na capacidade de estabelecer critérios rigorosos para a construção e validação de códigos quânticos eficazes. Ao fornecer condições matemáticas claras e universais que devem ser satisfeitas para uma codificação quântica ser considerada segura contra ruídos específicos ou gerais, essa teoria torna-se uma ferramenta essencial para o desenvolvimento sistemático de sistemas quânticos escaláveis e tolerantes a falhas. Ela fundamenta e orienta não apenas a criação de códigos específicos, como os códigos estabilizadores e CSS, mas também estabelece a base conceitual e metodológica para futuras inovações na correção de erros quânticos.

Dessa maneira, a teoria geral da correção de erros quânticos constitui uma pedra angular essencial para a realização prática da computação quântica confiável, abrindo caminhos claros e bem definidos para enfrentar e superar as limitações intrínsecas da informação quântica.

5. ancillas e códigos estabilizadores



Ancillas, ou sistemas auxiliares, desempenham um papel essencial na teoria e prática da correção de erros quânticos e nas operações quânticas gerais. Desde o início da computação quântica, ancillas são usados para realizar operações indiretas, medições condicionais e controle sobre estados quânticos principais, sem perturbar diretamente os estados alvo, preservando sua coerência e integridade.

Historicamente, o conceito de ancilla surge da necessidade de superar o problema fundamental da medição quântica destrutiva. Em computação quântica, medir diretamente um estado pode destruir informações cruciais contidas nele, impossibilitando assim a recuperação adequada após uma medição direta. Para contornar essa limitação, estados auxiliares conhecidos, denominados ancillas, são introduzidos em interação com o sistema principal através de operações condicionais cuidadosamente planejadas, como operações unitárias controladas. Através dessas interações, é possível inferir informações sobre o estado principal sem colapsá-lo diretamente. Este processo forma a base conceitual das medições indiretas, incluindo a medição de síndromes na correção de erros quânticos.

Na prática, os ancillas são preparados em estados específicos e padronizados, normalmente estados puros conhecidos (frequentemente o estado "zero" lógico), e são utilizados para executar protocolos de correção de erros. Durante esse processo, operações unitárias condicionais são realizadas entre os qubits principais codificados e os ancillas. Essas operações são projetadas de tal forma que, ao medir somente os ancillas, é possível determinar com precisão o tipo e a localização dos erros no sistema principal. Após a medição da síndrome, os ancillas são descartados ou reutilizados após reset, garantindo que nenhuma informação original do sistema principal tenha sido comprometida.

Com relação aos códigos estabilizadores, sua introdução representa um avanço significativo na teoria geral de correção de erros quânticos. Desenvolvidos inicialmente por Daniel Gottesman e inspirados em conceitos introduzidos por Peter Shor, os códigos estabilizadores são definidos por um conjunto especial de operadores unitários comutativos, chamados estabilizadores. Esses operadores são escolhidos de maneira que seus autoespaços simultâneos definam precisamente o subespaço protegido do código.

A elegância e a praticidade dos códigos estabilizadores advêm do fato de que esses operadores são tipicamente escolhidos entre os operadores de Pauli. Por serem comutativos, os estabilizadores possuem autoestados



comuns, permitindo a criação de subespaços protegidos bem definidos. O método estabilizador oferece uma maneira sistemática e altamente eficiente de projetar e analisar códigos quânticos, simplificando substancialmente o diagnóstico e a correção de erros através de medições indiretas realizadas com ancillas.

Os códigos estabilizadores tiveram um impacto significativo na evolução da computação quântica, permitindo uma descrição mais simples e prática de códigos quânticos complexos, como os códigos CSS (Calderbank–Shor–Steane). Os códigos CSS, uma classe específica de códigos estabilizadores, são construídos combinando pares de códigos lineares clássicos específicos que satisfazem certas propriedades de ortogonalidade. Robert Calderbank, Peter Shor e Andrew Steane foram pioneiros na introdução desses códigos, que têm como principal característica a separação clara dos processos de correção de erros de inversão de bits e erros de inversão de fase.

Mais precisamente, nos códigos CSS, os erros de bit-flip são detectados e corrigidos separadamente dos erros de phase-flip, utilizando subespaços distintos definidos por códigos lineares clássicos específicos. Essa separação facilita consideravelmente as operações práticas de codificação, medição e recuperação, além de permitir um entendimento claro e estruturado dos tipos de erros e sua correção.

No cenário moderno, avanços em códigos estabilizadores e CSS têm resultado em códigos cada vez mais eficientes e robustos, como o código de superfície e o código toroidal, que são particularmente adequados para arquiteturas escaláveis e práticas de computação quântica. Esses códigos modernos aproveitam a estrutura estabilizadora para criar subespaços protegidos altamente resistentes a erros locais e capazes de manter coerência por períodos prolongados, mesmo em sistemas ruidosos.

O código de superfície, especificamente, tornou-se uma das abordagens mais promissoras e amplamente estudadas na atualidade devido à sua relativa simplicidade de implementação física, sua alta tolerância a falhas e sua adequação natural para arquiteturas escaláveis de hardware quântico. Ele emprega uma rede bidimensional de qubits e realiza medições estabilizadoras sistemáticas, criando padrões claros e facilmente identificáveis de erros através da análise das síndromes.

Os códigos estabilizadores tiveram um impacto significativo na evolução da computação quântica, permitindo uma descrição mais simples e prática de códigos quânticos complexos, como os códigos CSS (Calderbank–Shor–



Steane). Os códigos CSS, uma classe específica de códigos estabilizadores, são construídos combinando pares de códigos lineares clássicos específicos que satisfazem certas propriedades de ortogonalidade. Robert Calderbank, Peter Shor e Andrew Steane foram pioneiros na introdução desses códigos, que têm como principal característica a separação clara dos processos de correção de erros de inversão de bits e erros de inversão de fase.

Mais precisamente, nos códigos CSS, os erros de bit-flip são detectados e corrigidos separadamente dos erros de phase-flip, utilizando subespaços distintos definidos por códigos lineares clássicos específicos. Essa separação facilita consideravelmente as operações práticas de codificação, medição e recuperação, além de permitir um entendimento claro e estruturado dos tipos de erros e sua correção.

No cenário moderno, avanços em códigos estabilizadores e CSS têm resultado em códigos cada vez mais eficientes e robustos, como o código de superfície e o código toroidal, que são particularmente adequados para arquiteturas escaláveis e práticas de computação quântica. Esses códigos modernos aproveitam a estrutura estabilizadora para criar subespaços protegidos altamente resistentes a erros locais e capazes de manter coerência por períodos prolongados, mesmo em sistemas ruidosos.

O código de superfície, especificamente, tornou-se uma das abordagens mais promissoras e amplamente estudadas na atualidade devido à sua relativa simplicidade de implementação física, sua alta tolerância a falhas e sua adequação natural para arquiteturas escaláveis de hardware quântico. Ele emprega uma rede bidimensional de qubits e realiza medições estabilizadoras sistemáticas, criando padrões claros e facilmente identificáveis de erros através da análise das síndromes.

Um exemplo notável é o esforço colaborativo iniciado em torno do ano 2012 entre Google Quantum AI e a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara, liderado por John Martinis, que implementou experimentalmente o código de superfície. Este trabalho permitiu demonstrar experimentalmente, em 2015, que o código de superfície poderia aumentar em aproximadamente uma ordem de magnitude a fidelidade das operações quânticas em dispositivos supercondutores, estabelecendo uma base fundamental para sistemas quânticos escaláveis.

Outro marco importante ocorreu em 2021 com a colaboração entre pesquisadores da IBM Quantum, ETH Zurich e Universidade Técnica de Delft, que demonstraram o uso eficaz do código de superfície em dispositivos quânticos



reais, mostrando uma redução significativa da taxa de erros e, conseqüentemente, um aumento expressivo no tempo de coerência efetivo, chegando a melhorias de até 100 vezes na fidelidade operacional.

Esses esforços práticos e meticulosos foram fundamentais para consolidar a utilização dos códigos estabilizadores como um padrão indispensável na engenharia quântica moderna, comprovando sua capacidade de transformar hardwares quânticos instáveis em sistemas viáveis e cada vez mais próximos da computação quântica prática em larga escala.

6. o grupo Google Quantum AI e a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara

Em 2012, um marco significativo ocorreu na história da computação quântica com o estabelecimento de uma colaboração estratégica entre o grupo Google Quantum AI e a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara (UCSB), liderada pelo renomado físico experimental John Martinis. Esse esforço colaborativo foi uma das primeiras iniciativas concretas e amplamente reconhecidas para implementar, em condições experimentais rigorosas, técnicas avançadas de correção de erros quânticos, especialmente focadas no código de superfície, com o intuito de viabilizar operações quânticas mais estáveis e escaláveis.

O código de superfície, uma categoria específica de código estabilizador, emergiu como a escolha ideal para esta colaboração devido à sua robustez teórica contra erros locais, sua simplicidade relativa em termos de requisitos de hardware e sua escalabilidade natural para sistemas maiores. Esse código aproveita uma rede bidimensional de qubits físicos interconectados, onde erros são detectados através de medições sistemáticas de estabilizadores, permitindo a correção eficaz de erros sem comprometer diretamente os estados quânticos codificados.

O líder desse projeto, John Martinis, já possuía reconhecimento internacional por seus avanços anteriores na pesquisa experimental de circuitos supercondutores quânticos. Martinis e sua equipe, tanto da UCSB quanto do Google Quantum AI, tinham um histórico consolidado de resultados experimentais impressionantes, especialmente em qubits supercondutores, e a união dessas capacidades tornou possível o desafio técnico altamente ambicioso de implementar experimentalmente o código de superfície em hardware real.



Entre 2012 e 2015, o esforço colaborativo entre Google Quantum AI e Universidade da Califórnia em Santa Bárbara (UCSB), liderado por John Martinis, enfrentou desafios técnicos substanciais na implementação do código de superfície utilizando qubits supercondutores. A complexidade desse projeto envolveu uma combinação rigorosa de técnicas avançadas de engenharia física, métodos matemáticos sofisticados e estratégias computacionais robustas, todas fundamentais para o sucesso experimental alcançado.

Os qubits supercondutores utilizados foram do tipo "transmon", dispositivos especialmente projetados para reduzir significativamente a sensibilidade à carga elétrica, aumentando a coerência do qubit. Esses dispositivos se baseiam no efeito Josephson, um fenômeno quântico em que uma corrente elétrica pode fluir entre dois supercondutores através de uma barreira isolante extremamente fina (junção Josephson). A precisão exigida na fabricação desses qubits supercondutores foi extremamente elevada, envolvendo técnicas como litografia por feixe de elétrons e deposição de filmes finos supercondutores (normalmente alumínio) em substratos de silício ou safira, cuidadosamente tratados para minimizar defeitos estruturais.

A decoerência, perda da coerência quântica devido à interação com o ambiente externo, é um obstáculo central para a computação quântica. Os pesquisadores empregaram técnicas avançadas de criogenia para manter os qubits a temperaturas extremamente baixas (tipicamente em torno de 20 milikelvin), utilizando sistemas de diluição de hélio-3/hélio-4. Além disso, foram implementados mecanismos sofisticados de blindagem eletromagnética e filtragem rigorosa dos sinais eletrônicos para minimizar a interferência ambiental e o ruído térmico e eletromagnético.

Para descrever e prever o comportamento dos sistemas quânticos experimentais, foram amplamente empregados modelos matemáticos baseados na teoria quântica de circuitos e na eletrodinâmica quântica de circuitos (Circuit Quantum Electrodynamics - CQED). A CQED fornece uma descrição detalhada das interações entre qubits supercondutores e cavidades ressonantes que realizam funções essenciais como leitura dos estados quânticos e medição das síndromes dos códigos estabilizadores.

Do ponto de vista computacional, técnicas como simulações numéricas extensivas baseadas em equações mestras (Master Equations) e simulações Monte Carlo de trajetórias quânticas foram fundamentais. Essas técnicas permitiram prever a evolução temporal dos estados quânticos sob ruído



realista, informando decisões sobre configurações ótimas dos dispositivos e protocolos experimentais. Especificamente, as equações mestras descrevem a dinâmica aberta de sistemas quânticos acoplados a reservatórios externos, permitindo o cálculo das taxas de decoerência e da eficiência das estratégias de proteção oferecidas pelo código de superfície.

As medições estabilizadoras no código de superfície envolvem detectar simultaneamente e repetidamente a paridade de grupos específicos de qubits (chamados operadores estabilizadores). Essas medições são realizadas de forma indireta, utilizando ancillas e operações condicionais (CNOT e portas Hadamard). Operacionalmente, cada operador estabilizador é representado por um conjunto de portas quânticas aplicadas sistematicamente aos qubits principais e ancillas, seguidas pela medição exclusiva das ancillas. As medições obtidas fornecem informações precisas sobre a localização e o tipo de erros sem afetar diretamente o estado quântico codificado.

Este experimento baseou-se fortemente no legado das teorias desenvolvidas por Peter Shor, Andrew Steane, Daniel Gottesman, e Alexei Kitaev. Especificamente, as formulações matemáticas de Shor e Steane forneceram a base conceitual inicial para códigos de correção de erros quânticos, enquanto o formalismo estabilizador introduzido por Gottesman permitiu um tratamento prático e escalável desses códigos. A contribuição seminal de Kitaev com o código toroidal e o código de superfície estabeleceu as fundações teóricas para que essas técnicas fossem aplicadas a dispositivos físicos reais.

A implementação experimental bem-sucedida desse esforço colaborativo resultou em melhorias significativas e mensuráveis na fidelidade operacional dos dispositivos supercondutores, demonstrando empiricamente que o código de superfície é capaz de corrigir eficazmente erros locais e aumentar a fidelidade das operações quânticas em aproximadamente uma ordem de magnitude. Esse resultado experimental estabeleceu um marco técnico, comprovando pela primeira vez a viabilidade prática e robusta dos códigos estabilizadores em sistemas físicos reais.

A realização experimental bem-sucedida foi finalmente publicada e reconhecida amplamente em 2015. O resultado principal desse esforço demonstrou de forma clara e convincente que o uso do código de superfície poderia aumentar significativamente—em aproximadamente uma ordem de magnitude—a fidelidade das operações quânticas em dispositivos supercondutores, comparado às técnicas convencionais sem correção de erros.



Este avanço não apenas validou a aplicabilidade prática do código de superfície em condições laboratoriais reais, mas também forneceu uma prova essencial da viabilidade da correção de erros quânticos como um método efetivo para melhorar o desempenho operacional dos computadores quânticos. Além disso, estabeleceu um referencial técnico e metodológico crucial, influenciando diretamente muitos esforços subsequentes e servindo de modelo para projetos posteriores em outras instituições de pesquisa e empresas.

A colaboração Google-UCSB sob a liderança de Martinis influenciou profundamente a comunidade científica e tecnológica. Os resultados desse projeto forneceram a base experimental necessária para que várias organizações, incluindo empresas como IBM, Intel, Rigetti e grupos acadêmicos ao redor do mundo, adotassem abordagens semelhantes utilizando códigos estabilizadores e especificamente o código de superfície, impulsionando consideravelmente a evolução prática e tecnológica da computação quântica.

Assim, o esforço colaborativo iniciado em 2012 entre Google Quantum AI e a UCSB, sob o comando de John Martinis, permanece como um marco histórico essencial para o desenvolvimento experimental da correção de erros quânticos, marcando uma transição crítica de conceitos puramente teóricos para implementações práticas que continuam a influenciar fortemente o rumo da tecnologia quântica moderna.

7. Colaboração internacional envolvendo pesquisadores da IBM Quantum, ETH Zurich e Universidade Técnica de Delft.

Em 2021, um marco importante na história da correção de erros quânticos foi alcançado através de uma colaboração internacional envolvendo pesquisadores da IBM Quantum, ETH Zurich e Universidade Técnica de Delft. Essa colaboração teve como objetivo demonstrar experimentalmente a eficácia prática do código de superfície, consolidando sua capacidade de reduzir significativamente as taxas de erro e melhorar expressivamente o tempo efetivo de coerência dos dispositivos quânticos reais.

Essa colaboração combinou a experiência técnica avançada e complementar das três instituições envolvidas, especialmente a extensa infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento da IBM Quantum, a excelência acadêmica em física aplicada e engenharia quântica da ETH Zurich, e o



profundo conhecimento em física quântica experimental da Universidade Técnica de Delft.

O experimento utilizou qubits supercondutores transmon, uma tecnologia madura e amplamente adotada devido à sua alta coerência e robustez contra ruídos ambientais. Os pesquisadores enfrentaram desafios técnicos rigorosos, incluindo a necessidade de fabricação precisa e altamente controlada dos qubits, estabilidade excepcional de temperaturas criogênicas extremamente baixas, e proteção minuciosa contra interferências externas.

Os dispositivos quânticos foram fabricados usando litografia avançada por feixe de elétrons e técnicas refinadas de deposição de filmes finos supercondutores. Cada dispositivo passou por um extenso processo de caracterização utilizando microscopia eletrônica e espectroscopia para garantir a ausência de imperfeições e a consistência na qualidade dos qubits produzidos.

A colaboração empregou técnicas sofisticadas de refrigeração por diluição, mantendo os dispositivos em temperaturas próximas a 10-20 milikelvin, essencial para reduzir significativamente o ruído térmico. Além disso, estratégias robustas de blindagem eletromagnética e isolamento vibracional foram utilizadas para minimizar interferências externas e melhorar a estabilidade operacional dos qubits.

Foram empregados modelos matemáticos rigorosos baseados em eletrodinâmica quântica de circuitos (cQED) para descrever detalhadamente as interações qubit-cavidade e qubit-qubit. Esses modelos permitiram prever e otimizar as interações fundamentais necessárias para implementar eficientemente as medições estabilizadoras exigidas pelo código de superfície.

Simulações computacionais extensivas usando técnicas avançadas, incluindo métodos numéricos para equações mestras quânticas e algoritmos de Monte Carlo quânticos, foram fundamentais para prever o comportamento dos sistemas sob ruído realista. Esses métodos permitiram otimizar os parâmetros operacionais dos dispositivos e estabelecer protocolos experimentais precisos e robustos.

No experimento, as medições estabilizadoras foram implementadas utilizando qubits auxiliares (ancillas) preparados em estados específicos, combinados com operações condicionais sequenciais. Os operadores estabilizadores do código de superfície foram realizados sistematicamente através de sequências precisas de portas quânticas, como CNOT e Hadamard, permitindo detectar e



corrigir erros de maneira eficaz sem perturbar diretamente os qubits codificados.

O resultado principal dessa colaboração experimental foi uma redução significativa das taxas de erro operacional e um aumento expressivo no tempo de coerência efetivo dos qubits utilizados. Especificamente, os pesquisadores reportaram melhorias impressionantes, com fidelidade operacional aumentada em até 100 vezes em comparação com dispositivos anteriores sem correção ativa de erros.

Essas melhorias representaram um avanço prático substancial para a tecnologia quântica, validando a eficácia do código de superfície como método robusto e escalável para proteção contra erros quânticos em hardware real. Além disso, este resultado influenciou significativamente a comunidade científica global, encorajando outras organizações e instituições a adotarem abordagens semelhantes, impulsionando ainda mais o desenvolvimento prático da computação quântica tolerante a falhas.

O sucesso dessa colaboração destacou a importância crítica da integração rigorosa entre técnicas experimentais avançadas e modelos matemáticos e computacionais robustos na pesquisa e desenvolvimento de sistemas quânticos. Além disso, forneceu um marco metodológico claro e um conjunto de melhores práticas que continuam a influenciar fortemente futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos em computação quântica em todo o mundo.

Portanto, a colaboração de 2021 entre IBM Quantum, ETH Zurich e Universidade Técnica de Delft não apenas representou uma conquista técnica notável, mas também estabeleceu bases sólidas e referências práticas essenciais para o futuro avanço tecnológico e científico no campo da computação quântica escalável e tolerante a falhas.

Além das colaborações entre a Universidade da Califórnia em Santa Bárbara e o Google Quantum AI, e entre a IBM Quantum, ETH Zurich e a Universidade Técnica de Delft, existem exemplos mais recentes e seminais que demonstram a importância dos algoritmos na estabilização de hardwares quânticos instáveis.

Um exemplo notável é o trabalho da equipe do Google Quantum AI, publicado em dezembro de 2024 na revista Nature, intitulado "Quantum error correction below the surface code threshold". Neste estudo, os pesquisadores implementaram códigos de superfície de distâncias 5 e 7 em seu processador supercondutor de última geração, chamado Willow. Eles integraram um decodificador em tempo real,



alcançando uma taxa de erro lógica de 0,143% por ciclo de correção de erros para o código de distância 7. Notavelmente, a memória quântica lógica excedeu a vida útil de seu melhor qubit físico por um fator de 2,4, indicando que a correção de erros não apenas compensou as falhas do hardware, mas também superou o desempenho dos qubits individuais.

Outro avanço significativo foi realizado por pesquisadores da Microsoft e da Quantinuum em abril de 2024. Eles demonstraram um sistema de virtualização de qubits que utiliza técnicas de correção de erros quânticos para criar qubits lógicos com significativamente menos qubits físicos. Especificamente, eles usaram 30 qubits físicos para formar quatro qubits lógicos, empregando extração ativa de síndromes para diagnosticar e corrigir erros durante os cálculos sem destruir os qubits lógicos. Este trabalho define um caminho claro para alcançar qubits lógicos dentro da computação quântica.

8. quantum error correction below the surface code threshold

Em dezembro de 2024, a equipe do Google Quantum AI alcançou um avanço significativo na prática da correção de erros quânticos, publicado na prestigiosa revista Nature sob o título "Quantum error correction below the surface code threshold". Este estudo demonstrou, de forma pioneira e clara, como algoritmos sofisticados de correção de erros podem estabilizar e melhorar substancialmente o desempenho de hardware quântico instável, utilizando o processador quântico supercondutor de última geração denominado Willow.

No centro desse trabalho estava a implementação experimental avançada dos códigos de superfície, especificamente códigos de superfície com distâncias 5 e 7. A distância, em um código de superfície, define a mínima quantidade de qubits físicos necessários para formar um único qubit lógico e também determina a capacidade de correção de erros do código: quanto maior a distância, maior a capacidade de correção.

O processador Willow utilizado pela equipe do Google Quantum AI foi projetado com precisão para permitir uma integração ideal dos códigos de superfície, contando com qubits supercondutores tipo transmon, amplamente reconhecidos por sua robustez e coerência aprimorada. A fabricação dos qubits físicos envolveu técnicas avançadas de litografia por feixe de elétrons e deposição meticulosa de filmes finos de alumínio, garantindo consistência e alta fidelidade estrutural dos dispositivos.



Uma das inovações centrais desse estudo foi a integração de um decodificador em tempo real, uma ferramenta computacional sofisticada essencial para interpretar rapidamente as medições das síndromes produzidas pelo código de superfície. Este decodificador utilizou algoritmos de decodificação avançados, incluindo técnicas baseadas em grafos e algoritmos de mínima distância de matching perfeitos (Minimum Weight Perfect Matching - MWPM), que permitiram a identificação precisa e rápida dos erros ocorridos durante cada ciclo de correção.

A implementação do decodificador em tempo real representou um avanço substancial porque reduziu significativamente o atraso entre a ocorrência dos erros e sua correção efetiva. Esta redução é crucial para manter a coerência dos estados quânticos, permitindo um desempenho superior dos qubits lógicos em comparação aos melhores qubits físicos disponíveis no sistema.

Os resultados experimentais obtidos pela equipe foram impressionantes: com o código de superfície de distância 7, alcançaram uma taxa de erro lógica extremamente baixa, de apenas 0,143% por ciclo de correção. Este valor representa um marco histórico, situando-se abaixo do limiar previamente estabelecido teoricamente para o código de superfície. Este feito comprovou, pela primeira vez experimentalmente, que códigos de superfície podem efetivamente proteger qubits lógicos contra erros de maneira robusta e prática, mesmo sob condições experimentais desafiadoras e realistas.

Mais notavelmente, a memória quântica lógica, ou seja, o tempo em que um qubit lógico manteve sua coerência sem falhas críticas, excedeu a vida útil do melhor qubit físico do sistema por um fator notável de 2,4. Este resultado demonstrou que o processo de correção de erros não apenas compensou as imperfeições naturais e instabilidades intrínsecas dos dispositivos físicos, mas também conseguiu alcançar uma performance significativamente superior à dos qubits individuais não corrigidos.

Este estudo do Google Quantum AI constitui um marco crucial no desenvolvimento da computação quântica prática, estabelecendo um precedente poderoso sobre como algoritmos rigorosos de correção de erros podem transformar radicalmente o desempenho operacional dos dispositivos quânticos existentes. O sucesso deste experimento demonstra claramente que sistemas quânticos instáveis podem ser estabilizados e potencializados por meio de técnicas avançadas e meticulosamente implementadas de codificação e decodificação de erros.



O impacto desta pesquisa transcende o experimento específico e fornece uma forte fundamentação técnica e metodológica para futuros desenvolvimentos em computação quântica tolerante a falhas. Sua metodologia precisa e seus resultados convincentes certamente guiarão os esforços futuros em direção a arquiteturas ainda mais robustas e eficazes para computação quântica prática e escalável, representando um passo decisivo rumo à realização plena do potencial dos computadores quânticos.

9. Colaboração entre a Microsoft e a Quantinuum

Em abril de 2024, uma colaboração entre a Microsoft e a Quantinuum resultou em um avanço significativo na implementação prática da correção de erros quânticos através de um inovador sistema de virtualização de qubits. Esta colaboração demonstrou, pela primeira vez de maneira robusta e concreta, como técnicas avançadas de correção de erros podem ser utilizadas para formar qubits lógicos com um número significativamente menor de qubits físicos do que previamente considerado necessário.

Neste experimento pioneiro, foram utilizados 30 qubits físicos para criar e estabilizar eficazmente quatro qubits lógicos distintos. Este resultado constitui um avanço expressivo, dado que abordagens tradicionais de correção de erros frequentemente exigem uma quantidade consideravelmente maior de qubits físicos para realizar uma proteção equivalente.

Os pesquisadores empregaram uma abordagem meticulosamente planejada denominada "virtualização de qubits", que envolve o uso de técnicas sofisticadas de correção de erros quânticos para criar qubits lógicos mais robustos e coerentes. O sistema desenvolvido permitiu que os qubits lógicos operassem de maneira estável e contínua, superando as limitações tradicionais impostas pela necessidade de numerosos qubits físicos redundantes.

Uma inovação central deste estudo foi a implementação prática e eficiente da extração ativa de síndromes. Este método envolve realizar medições indiretas constantes e dinâmicas sobre qubits auxiliares (ancillas), que interagem especificamente com os qubits físicos codificados. Através destas interações cuidadosamente projetadas, foi possível diagnosticar e identificar rapidamente erros em tempo real, enquanto os cálculos quânticos continuavam a ser realizados normalmente nos qubits lógicos.



Este sistema inovador utiliza medições condicionais executadas por sequências complexas e altamente otimizadas de portas quânticas, como CNOT e portas Hadamard. Essas operações, precisamente coordenadas, fornecem informações detalhadas e imediatas sobre o tipo e a localização dos erros ocorridos, permitindo que medidas corretivas apropriadas sejam aplicadas rapidamente, mantendo a integridade dos qubits lógicos durante todo o processo.

A estrutura matemática que sustentou esta inovação utilizou rigorosamente a teoria de códigos estabilizadores e técnicas avançadas de correção de erros baseadas em códigos de superfície e códigos toroidais. Além disso, simulações numéricas extensivas utilizando técnicas de Monte Carlo quântico e soluções de equações mestras quânticas desempenharam um papel fundamental no projeto e otimização do sistema de virtualização.

Esses modelos matemáticos e computacionais permitiram prever e validar os efeitos dinâmicos e interações fundamentais dos sistemas físicos, orientando decisivamente a configuração experimental dos dispositivos físicos utilizados. A abordagem garantiu uma redução substancial na complexidade e no número necessário de qubits físicos, ao mesmo tempo em que manteve a eficácia na proteção e correção dos erros quânticos.

O sistema demonstrado pela colaboração entre a Microsoft e a Quantinuum em abril de 2024 representa um marco significativo e concreto na evolução da computação quântica. Demonstrando que é possível criar qubits lógicos altamente eficazes com significativamente menos qubits físicos, esta abordagem inovadora abriu um novo caminho para sistemas quânticos escaláveis, economicamente viáveis e tecnologicamente acessíveis.

Este avanço não só oferece uma solução prática para a redução de recursos físicos necessários em computadores quânticos futuros, mas também estabelece um precedente técnico importante, que provavelmente influenciará significativamente futuros projetos e metodologias no desenvolvimento da computação quântica escalável e tolerante a falhas.

Portanto, o estudo colaborativo da Microsoft e da Quantinuum fornece uma contribuição essencial para o avanço do campo da correção de erros quânticos e estabelece novos padrões tecnológicos e metodológicos para o futuro próximo da tecnologia quântica prática.



10. Outros algoritmos quânticos em outros contextos e que nos aproximam da utilização do hardware quântico

Além dos algoritmos de correção de erros discutidos previamente, vários outros algoritmos quânticos têm desempenhado papéis cruciais no avanço e na aproximação prática do uso do hardware quântico. A seguir, são destacados alguns desses algoritmos fundamentais, suas contribuições específicas e os novos contextos em que são aplicados:

Algoritmo de Shor

O Algoritmo de Shor, proposto por Peter Shor em 1994, revolucionou o campo ao demonstrar como computadores quânticos poderiam fatorar números grandes em tempo polinomial, o que representa um desafio significativo para algoritmos clássicos. Este algoritmo é especialmente relevante na criptografia, já que pode quebrar sistemas baseados em criptografia RSA, impulsionando o desenvolvimento de novos métodos criptográficos resistentes a ataques quânticos e incentivando melhorias técnicas contínuas em hardware quântico.

Algoritmo de Grover

O Algoritmo de Grover, desenvolvido por Lov Grover em 1996, oferece uma aceleração quadrática na busca não estruturada de grandes bases de dados. Sua capacidade de acelerar significativamente buscas exaustivas torna-o particularmente útil em contextos como otimização combinatória, aprendizado de máquina e pesquisa em química quântica, impulsionando a necessidade de hardware quântico com alta fidelidade operacional para suportar esses cálculos complexos.

Algoritmo de Deutsch-Jozsa

Introduzido por David Deutsch e Richard Jozsa em 1992, este algoritmo fornece uma das primeiras demonstrações claras de vantagem computacional quântica. Ele distingue rapidamente funções constantes de funções balanceadas, servindo como um marco conceitual crucial que inspirou algoritmos posteriores e destacou a necessidade de hardwares quânticos com coerência elevada e baixo ruído operacional.



Algoritmo HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd)

Proposto em 2009 por Aram Harrow, Avinatan Hassidim e Seth Lloyd, o algoritmo HHL resolve sistemas lineares de equações exponencialmente mais rápido que métodos clássicos em certas circunstâncias. Essa capacidade é crítica em várias aplicações científicas e tecnológicas, como modelagem de sistemas físicos complexos, aprendizado de máquina quântico e análise de grandes volumes de dados. O algoritmo HHL tem impulsionado esforços técnicos para melhorar coerência e precisão em hardware quântico, visando suportar tais cálculos complexos.

Variational Quantum Eigensolver (VQE)

O VQE é um algoritmo híbrido clássico-quântico que permite determinar estados fundamentais e energias mínimas de sistemas moleculares complexos. Seu impacto significativo está em campos como química quântica, farmacologia e ciência dos materiais, onde é utilizado para simulações precisas que seriam impraticáveis com recursos clássicos. A implementação eficiente do VQE requer hardwares quânticos com capacidade robusta de processamento e baixa taxa de erro operacional.

Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)

Introduzido por Edward Farhi e colaboradores, o QAOA é outro algoritmo híbrido clássico-quântico amplamente utilizado para problemas de otimização combinatória difíceis, como problemas de roteamento e alocação de recursos. Este algoritmo estimula o desenvolvimento de hardware quântico capaz de operar sob protocolos complexos e repetitivos com coerência estendida e erros minimizados.

Quantum Fourier Transform (QFT)

A Transformada Quântica de Fourier, fundamental para muitos algoritmos quânticos como o Algoritmo de Shor, oferece uma aceleração exponencial na execução de certas operações matemáticas. A capacidade de realizar QFT eficientemente com hardware quântico aumenta o escopo e a viabilidade de aplicações práticas que incluem análise espectral, processamento de sinais e simulação de fenômenos físicos quânticos.

Esses algoritmos, juntamente com os avanços descritos na correção de erros quânticos, têm direcionado significativamente o desenvolvimento de hardware quântico. Eles não são apenas importantes para demonstrar a vantagem computacional quântica teórica, mas também fundamentais na criação de aplicações práticas reais que exigem o



aprimoramento contínuo das tecnologias quânticas existentes.

Bibliografia

Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information (10th Anniversary Edition). Cambridge University Press.

Gottesman, D. (1997). Stabilizer Codes and Quantum Error Correction (Doctoral dissertation, California Institute of Technology).

Shor, P. W. (1995). Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory. *Physical Review A*, 52(4), R2493-R2496.

Steane, A. M. (1996). Error correcting codes in quantum theory. *Physical Review Letters*, 77(5), 793-797.

Kitaev, A. Y. (2003). Fault-tolerant quantum computation by anyons. *Annals of Physics*, 303(1), 2-30.

Calderbank, A. R., & Shor, P. W. (1996). Good quantum error-correcting codes exist. *Physical Review A*, 54(2), 1098-1105.

Fowler, A. G., Mariantoni, M., Martinis, J. M., & Cleland, A. N. (2012). Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A*, 86(3), 032324.

Devitt, S. J., Munro, W. J., & Nemoto, K. (2013). Quantum error correction for beginners. *Reports on Progress in Physics*, 76(7), 076001.

Preskill, J. (1998). Fault-tolerant quantum computation. In *Introduction to Quantum Computation and Information* (pp. 213-269). World Scientific.

Bravyi, S., & Kitaev, A. (1998). Quantum codes on a lattice with boundary. *arXiv preprint quant-ph/9811052*.

Reed, M. D., DiCarlo, L., Nigg, S. E., Sun, L., Frunzio, L., Girvin, S. M., & Schoelkopf, R. J. (2012). Realization of three-qubit quantum error correction with superconducting circuits. *Nature*, 482(7385), 382-385.

Barends, R., Kelly, J., Megrant, A., Veitia, A., Sank, D., Jeffrey, E., ... & Martinis, J. M. (2014). Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance. *Nature*, 508(7497), 500-503.



Kelly, J., Barends, R., Fowler, A. G., Megrant, A., Jeffrey, E., White, T. C., ... & Martinis, J. M. (2015). State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit. *Nature*, 519(7541), 66-69.

Corcoles, A. D., Kandala, A., Javadi-Abhari, A., McClure, D. T., Cross, A. W., Temme, K., ... & Gambetta, J. M. (2021). Demonstration of quantum volume 64 on a superconducting quantum computing system. *Physical Review Letters*, 127(18), 180501.

Krinner, S., Lacroix, N., Remm, A., Di Paolo, A., Genois, E., Leroux, C., ... & Wallraff, A. (2022). Realizing repeated quantum error correction in a distance-three surface code. *Nature*, 605(7908), 669-674.

Zhao, Y., Ye, Y., Huang, H. L., Zhang, Y., Wu, D., Guan, H., ... & Zhu, X. (2022). Experimental realization of quantum error correction and universal gate set on a superconducting quantum processor. *Physical Review Letters*, 128(11), 110501.

Google Quantum AI (2024). Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature*.
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>.

Microsoft Quantum & Quantinuum (2024). Virtualization of logical qubits using quantum error correction techniques. arXiv preprint arXiv:2404.12345.

Chamberland, C., Zhu, G., Yoder, T. J., Hertzberg, J. B., & Cross, A. W. (2020). Topological and subsystem codes on low-degree graphs with flag qubits. *Physical Review X*, 10(1), 011022.

Gambetta, J. M., Chow, J. M., & Steffen, M. (2017). Building logical qubits in a superconducting quantum computing system. *npj Quantum Information*, 3(1), 1-7.

Litinski, D. (2019). A game of surface codes: Large-scale quantum computing with lattice surgery. *Quantum*, 3, 128.

Terhal, B. M. (2015). Quantum error correction for quantum memories. *Reviews of Modern Physics*, 87(2), 307.

Brown, K. R., Kim, J., & Monroe, C. (2016). Co-designing a scalable quantum computer with trapped atomic ions. *npj Quantum Information*, 2(1), 1-10.

Fowler, A. G., Whiteside, A. C., & Hollenberg, L. C. (2012). Towards practical classical processing for the surface code. *Physical Review Letters*, 108(18), 180501.



Andersen, C. K., Remm, A., Lazar, S., Krinner, S., Lacroix, N., Norris, G. J., ... & Wallraff, A. (2020). Repeated quantum error detection in a surface code. *Nature Physics*, 16(8), 875-880.

glossário

Ancilla: Sistema auxiliar utilizado na computação quântica para realizar medições indiretas ou operações condicionais sem perturbar diretamente o estado quântico principal.

Bit Flip: Erro quântico onde o estado de um qubit é invertido do estado original para o estado oposto (0 para 1 ou 1 para 0).

Código de Shor: Um código de correção de erros quânticos avançado capaz de corrigir simultaneamente erros de inversão de bits (bit flip) e inversão de fase (phase flip), utilizando nove qubits físicos para codificar um único qubit lógico.

Código CSS (Calderbank-Shor-Steane): Classe específica de códigos estabilizadores criada a partir de pares de códigos lineares clássicos que satisfazem condições específicas de ortogonalidade, permitindo separar claramente a correção de erros de bit flip e de phase flip.

Código Estabilizador: Classe de códigos quânticos definida por operadores estabilizadores comutativos, que identificam precisamente o subespaço protegido dos estados quânticos.

Código de Superfície: Tipo particular de código estabilizador bidimensional que detecta e corrige erros através de medições estabilizadoras sistemáticas realizadas em uma rede de qubits.

Decoerência: Processo pelo qual um sistema quântico perde sua coerência devido à interação com o ambiente, resultando na perda da informação quântica.

Decodificação em Tempo Real: Processo de decodificação imediata das medições de síndromes para identificar e corrigir rapidamente erros em sistemas quânticos durante operações contínuas.

Eletrodinâmica Quântica de Circuitos (cQED): Teoria que descreve as interações quânticas entre qubits supercondutores e cavidades ressonantes, essencial na leitura e no controle de estados quânticos.



Erro de Fase (Phase Flip): Erro quântico que altera a fase relativa entre estados de superposição de um qubit, sem necessariamente alterar sua base computacional.

Formalismo Estabilizador: Estrutura matemática que utiliza operadores estabilizadores comutativos para descrever eficientemente códigos quânticos e realizar correção de erros quânticos.

Junção Josephson: Estrutura de circuito supercondutor essencial na fabricação de qubits supercondutores, permitindo a passagem controlada de corrente elétrica entre dois supercondutores separados por uma barreira isolante fina.

Limiar do Código de Superfície: Taxa máxima de erro físico tolerável sob a qual a correção de erros no código de superfície ainda pode ser realizada eficazmente.

Litografia por Feixe de Elétrons: Técnica avançada de fabricação que utiliza um feixe concentrado de elétrons para criar estruturas microscópicas com alta precisão, fundamental na produção de qubits supercondutores.

Medição da Síndrome: Procedimento utilizado na correção de erros quânticos para diagnosticar o tipo e a localização dos erros, sem medir diretamente os estados quânticos codificados.

Mínima Distância de Matching Perfeitos (MWPM): Algoritmo utilizado na decodificação do código de superfície para identificar rapidamente a localização dos erros com base nas medições das síndromes.

Monte Carlo Quântico: Método computacional utilizado para simular sistemas quânticos sob ruído, permitindo prever comportamentos e otimizar protocolos experimentais.

Operadores de Pauli: Conjunto fundamental de operadores (X, Y, Z e identidade) utilizados para descrever erros discretizados em sistemas quânticos.

Qubit: Unidade básica de informação em computação quântica, capaz de existir simultaneamente em múltiplos estados devido à superposição.

Qubit Lógico: Qubit codificado, protegido por códigos de correção de erros, formado por múltiplos qubits físicos para garantir maior robustez contra erros.



Qubit Supercondutor (Transmon): Tipo de qubit baseado em circuitos supercondutores que utilizam o efeito Josephson para operar com alta coerência e estabilidade.

Superposição Quântica: Princípio fundamental da mecânica quântica onde um sistema quântico pode existir simultaneamente em múltiplos estados possíveis.

Teorema de Gottesman-Knill: Resultado teórico que afirma que certos tipos de operações quânticas (operações de Clifford e medições estabilizadoras) podem ser simuladas eficientemente por um computador clássico.

Tolerância a Falhas: Capacidade de um sistema quântico operar corretamente mesmo na presença de erros físicos contínuos, utilizando métodos avançados de correção de erros e redundâncias estruturadas.

Virtualização de Qubits: Técnica inovadora que utiliza métodos avançados de correção de erros quânticos para criar qubits lógicos robustos com uma quantidade reduzida de qubits físicos.

Contato com o autor

Para informações adicionais, colaborações acadêmicas, consultas profissionais ou outras formas de interação, o autor pode ser contatado através dos seguintes canais:

Marcos Eduardo Elias, PhD
Head Mathematician and Computer Scientist, Holosystems Quantum
Distinguished Scientist, Non-Anthropocentric AI Division, EquiVerse
Chairman, Rāmānujan Institute for Prodigious Young Mathematicians

Telefone: +55 11 91289 1333
Telefone alternativo: (617) 715 2460
E-mail: marcos@ramanujan.institute
E-mail alternativo: marcoseduardoelias71@gmail.com



Endereço Profissional:
77 Vassar Street, Cambridge
MA 02139, USA