

Computação quântica de átomos neutros: utilização do framework Bloqade na solução de problemas de Conjunto Independente

Neutral atoms quantum computing: using the Bloqade framework to solve Independent Set Problems

Anderson Fernandes Pereira dos Santos^{1,2}, Daniel de Haro Moraes^{1,3}, Edson Duarte¹,
Erico Souza Teixeira¹, Igor Coser Zandonadi Coser¹, João Batista Serino Dantas^{1,4},
João Felipe Bragança^{1,5}, Luiz Augusto Silvestre Luccas^{1,6}, Renato Carneiro¹,
José Erinaldo da Fonseca^{*1,3}

¹Venturus Centro de Inovação Tecnológica, Campinas, SP, Brasil.

²Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

⁵Laboratório Nacional de Computação Científica, Petrópolis, RJ, Brasil.

⁶Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil.

Recebido em 24 de outubro de 2025. Revisado em 09 de julho de 2026. Aceito em 31 de julho de 2026.

O uso de átomos neutros em computação quântica é uma tecnologia emergente. Diferente de outras plataformas, este sistema oferece uma abordagem distinta, que explora a manipulação precisa de átomos individuais em redes ópticas. Essas redes são criadas usando feixes de laser que mantêm os átomos em posições definidas dispostos em malhas com duas ou três dimensões. Essa organização maximiza o número de qubits de forma eficiente, respeitadas as condições de distanciamento dos átomos. Além disso, esse mecanismo aproveita os estados de alta energia da interação dos átomos para a realização de operações quânticas com maior fidelidade e eficiência. Identificar que problemas são mais adequados para quais tecnologias quânticas é um desafio permanente para a área. Neste trabalho é apresentado como encontrar uma solução para o problema de Conjunto Independente Máximo (*Maximum Independent Set* – *MIS*) através de um estudo de caso de posicionamento de painéis solares em uma região do estado de São Paulo. São apresentados os conceitos de MIS, do framework computacional disponibilizado pela QuEra (empresa líder do mercado de átomos neutros), Bloqade, e as etapas necessárias para a busca de uma solução do problema proposto. Portanto, este artigo apresenta um estudo de caso que demonstra a aplicação dessa tecnologia em um contexto real.

Palavras-chave: Computação Quântica, Átomos Neutros, Bloqade, Conjunto Independente Máximo.

The use of neutral atoms in quantum computing is an emerging technology. Unlike other platforms, this system offers a distinct approach that leverages the precise manipulation of individual atoms in optical lattices. These lattices are created using laser beams that hold atoms in defined positions arranged in two- or three-dimensional grids. This organization efficiently maximizes the number of qubits, while respecting the spacing conditions required between atoms. Furthermore, this mechanism leverages high-energy atomic states for performing quantum operations with higher fidelity and efficiency. Identifying which problems are best suited for each quantum technology remains an ongoing challenge in the field. This work presents a solution approach to the Maximum Independent Set (MIS) problem, using a case study on the placement of solar panels in a region of the state of São Paulo. We introduce the MIS concept, the computational framework provided by QuEra (a leading company in the neutral atom market), Bloqade, and the necessary steps for solving the proposed problem. Therefore, this paper presents a case study that demonstrates the application of this technology in a real-world context.

Keywords: Quantum Computing, Neutral Atoms, Bloqade, Maximum Independent Set.

*Endereço de correspondência: eriminas@hotmail.com

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

1. Introdução

A década de 1980 é amplamente reconhecida como um marco inicial no desenvolvimento da computação quântica. Naquele período, já se compreendia que a computação é, essencialmente, um processo físico, e pesquisadores passaram a discutir de maneira mais sistemática como problemas reais de alta complexidade poderiam ser resolvidos em escalas de tempo viáveis à medida que os modelos incorporassem um número crescente de variáveis, como reações nucleares, estrutura eletrônica dos átomos e interações entre partículas próximas. Em 1982, Richard Feynman deu um passo fundamental ao propor o conceito de um “simulador quântico universal” [1]. Embora esse modelo fosse capaz de simular qualquer sistema com espaço de estados de dimensão finita, ele ainda não correspondia a uma máquina de computação no sentido adotado neste trabalho. Em 1984, David Deutsch apresentou um modelo geral e inteiramente quântico para a computação, descrevendo o computador quântico universal, capaz de simular, com precisão arbitrariamente alta, qualquer sistema físico finito realizável [2]. Esse modelo permitia a simulação de sistemas ideais fechados (sem interação com um banho térmico), abrangendo outras instâncias de computadores e simuladores quânticos, ainda que não de forma absolutamente perfeita. Além disso, introduzia capacidades notáveis, sem equivalentes clássicos, e potencialmente úteis do ponto de vista computacional. Assim, pioneiros como Feynman e Deutsch propuseram explorar princípios fundamentais da mecânica quântica, como superposição, interferência e emaranhamento, para conceber máquinas capazes de processar informação de formas antes inalcançáveis [1, 2]. A partir dessas ideias, diversas abordagens tecnológicas passaram a ser desenvolvidas com o objetivo de tornar viáveis os computadores quânticos.

Entre as primeiras tecnologias a demonstrar qubits funcionais destacam-se os circuitos supercondutores, que utilizam pequenas estruturas de material supercondutor nas quais a corrente elétrica pode fluir sem resistência. Essa abordagem ganhou projeção com o desenvolvimento de qubits baseados em junções Josephson [3]. Grandes empresas, como IBM e Google, adotaram essa tecnologia como base para a construção de seus computadores quânticos [4].

Outra plataforma promissora para a implementação de hardware quântico é a dos íons aprisionados. Nessa abordagem, átomos ionizados são confinados por campos eletromagnéticos e manipulados por meio de lasers. Seu desenvolvimento foi fortemente impulsionado por experimentos que demonstraram controle preciso de estados quânticos individuais, como os realizados por Wineland e colaboradores [5]. Empresas como IonQ e Honeywell têm avançado significativamente nessa área, produzindo dispositivos com elevados níveis de estabilidade e perspectivas de escalabilidade.

Uma linha igualmente relevante no desenvolvimento da computação quântica é o uso de spins eletrônicos em materiais semicondutores. Essa tecnologia baseia-se no controle do spin de elétrons em pontos quânticos para a codificação de informação quântica [6]. Trata-se de uma área intensamente investigada por grupos acadêmicos e por empresas como a Silicon Quantum Computing, que buscam integrar qubits diretamente a tecnologias baseadas em silício.

A computação quântica baseada em fotônica também se consolidou como uma alternativa viável, ainda que enfrente desafios significativos relacionados à escalabilidade. A fotônica oferece vantagens no transporte e na manipulação de informação quântica, utilizando fótons como portadores de qubits. Essa abordagem se destaca pelo baixo nível de ruído e pela possibilidade de operar em temperatura ambiente com alta fidelidade, como demonstrado nos experimentos conduzidos por Pan Jianwei e colaboradores [7].

Mais recentemente, os computadores quânticos baseados em átomos neutros passaram a figurar entre as tecnologias mais promissoras. Nessa abordagem, átomos neutros são resfriados por lasers e organizados em redes ópticas para formar qubits [8]. Pode-se afirmar, portanto, que a computação quântica com átomos neutros constitui uma tecnologia emergente e de grande potencial, na qual átomos eletricamente neutros atuam como unidades fundamentais de processamento de informação quântica. Diferentemente de plataformas baseadas em íons aprisionados ou circuitos supercondutores, os sistemas de átomos neutros se destacam pela manipulação precisa de átomos individuais organizados em redes ópticas. Essas redes são formadas por feixes de laser, conhecidos como pinças óticas, que mantêm os átomos em posições bem definidas, permitindo sua organização em malhas bidimensionais ou tridimensionais [9]. Essas características conferem à tecnologia vantagens importantes, como flexibilidade e potencial de escalabilidade, favorecendo o aumento do número de qubits de forma estruturada e eficiente.

As diferentes tecnologias quânticas, com suas abordagens e características específicas, permitem classificar o mercado em três grandes categorias, cada uma representando um caminho promissor rumo a possíveis convergências futuras. A primeira categoria é composta por computadores clássicos capazes de executar algoritmos clássicos e também rotinas inspiradas em algoritmos quânticos. Nessa classe situam-se as abordagens denominadas Quantum Inspired e Quantum Emulated (emuladores quânticos).

Os métodos Quantum Inspired correspondem a algoritmos clássicos que incorporam técnicas inspiradas em estratégias quânticas, embora sejam executados em hardware clássico. Essas abordagens são empregadas, sobretudo, para aprimorar o desempenho de algoritmos clássicos. Já os chamados Emuladores Quânticos consistem em códigos desenvolvidos em frameworks



Figura 1: Mercado de Computação Quântica – Quantum Inspired e Emuladores. Adaptado de [10].

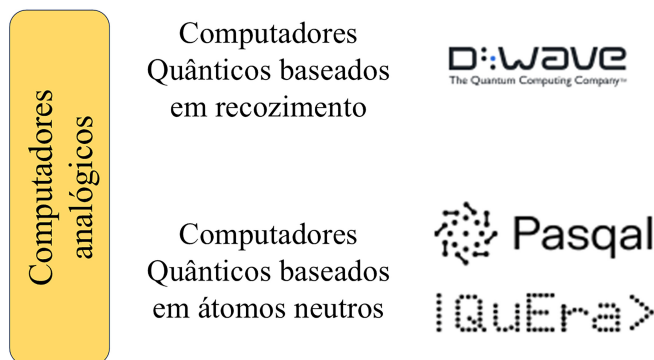


Figura 2: Mercado de Computação Quântica – Computadores baseados em recozimento (*quantum annealing*) e átomos neutros. Adaptado de [11].

quânticos, mas executados em computadores clássicos. A Figura 1 apresenta essa categoria, bem como algumas das principais empresas que atuam nesse segmento. Nessa classe de dispositivos, as atividades de depuração de código, treinamento de usuários e realização de testes constituem os principais focos de aplicação.

Na segunda classe, estão os computadores analógicos, que são aqueles que não possuem portas quânticas implementadas¹. Problemas de Otimização e de Física Quântica são mais indicados para esta classe. Este setor possui poucos representantes, conforme a Figura 2.

A última classe compreende os principais *players* do mercado e onde temos a maior concentração de empresas. IBM, Google e Microsoft estão neste grupo e, praticamente, ocupam todas as atenções do mercado, ditando as regras de como o mercado quântico vai se consolidar. Uma das principais características desta classe é a presença de portas quânticas, o que proporciona uma curva de aprendizagem mais suave. Todas as promessas e metas presentes na computação quântica estão, majoritariamente presentes nesta classe, que abrange tanto os dispositivos NISQ – *Noisy Intermediate Scale Quantum* – limitados por ruído e número de qubits,

¹ Embora estas empresas possuam a meta de implementar estas portas [10].



Figura 3: Mercado de Computação Quântica – Computadores NISQ e Tolerantes a falhas. Adaptado de [11].

quanto o objetivo futuro da computação tolerante a falhas, FTQC – *Fault-Tolerant Quantum Computing*. Todas as empresas atualmente podem ser classificadas como NISQ [10], conforme Figura 3.

Empresas como QuEra e Pasqal situam-se na segunda classe de tecnologias quânticas, baseadas no uso de átomos de Rydberg. Esses átomos são eletricamente neutros, possuem dimensões micrométricas e apresentam números quânticos principais elevados. A interação entre dois átomos de Rydberg pode ser extremamente intensa: por exemplo, a uma distância de $10\ \mu\text{m}$, essa interação é da ordem de 10^{13} vezes mais forte do que aquela observada entre dois átomos no estado fundamental separados pela mesma distância, o que se deve à elevada polarizabilidade desses estados excitados. Como consequência, quando um átomo é excitado para o estado de Rydberg, ele impede que átomos vizinhos próximos também sejam excitados, fenômeno conhecido como bloqueio de Rydberg. A excitação simultânea de átomos dentro de uma determinada vizinhança espacial (definida pela chamada distância de bloqueio, da ordem de $10\ \mu\text{m}$) leva à formação de estados quânticos de muitos corpos fortemente emaranhados. Essa interação intensa também possibilita a realização de portas lógicas quânticas rápidas, com taxas que podem atingir a ordem de MHz.

Computadores quânticos baseados em átomos de Rydberg podem ser descritos como grafos físicos formados por esses átomos, nos quais a natureza do emaranhamento de muitos corpos é controlada para a resolução de problemas quânticos ou clássicos de alta complexidade, seja por meio de simulação quântica, computação quântica adiabática ou computação quântica baseada em circuitos. Os átomos podem ser manipulados individualmente, de forma sequencial ou simultânea, por meio de lasers ou campos de radiofrequência (RF), permitindo que o estado de emaranhamento multipartido seja ajustado de acordo com o algoritmo quântico implementado. Um aspecto particularmente relevante dessa plataforma é a relativa facilidade de posicionar e mover átomos individuais, o que caracteriza os átomos de Rydberg como qubits não estacionários. Essa

Quadro 1: Habilidades da BNCC do Ensino Médio relacionadas ao uso de grafos [12].

Código da Habilidade	Descrição	Eixo Estruturante
EM13MAT407	Investigar propriedades de estruturas algébricas e combinatórias, como sequências, matrizes, grafos e árvores, e suas aplicações em diferentes contextos.	Pensamento Computacional e Matemática Discreta
EM13MAT405	Utilizar estruturas e técnicas de organização e tratamento de dados, como tabelas, gráficos, diagramas, árvores de possibilidades, grafos e matrizes, para resolver problemas de diferentes contextos.	Modelagem e Análise de Dados
EM13MAT502	Modelar e resolver problemas de contagem, organização e análise de situações reais por meio de estratégias de raciocínio combinatório, recorrência e estruturas discretas, como grafos, tabelas e diagramas.	Pensamento Computacional e Matemática Discreta
EM13MAT406	Analisar algoritmos de resolução de problemas, comparando sua eficiência e aplicabilidade, e implementá-los, com ou sem o uso de tecnologias digitais.	Pensamento Computacional

propriedade possibilita a reconfiguração das conexões entre qubits, potencialmente até mesmo durante a execução do processo computacional. Dessa forma, torna-se viável implementar grafos de Rydberg arbitrários, ou, de maneira equivalente, conexões de qubits adaptadas às exigências de problemas de otimização combinatória na computação quântica adiabática. A versatilidade desses grafos físicos tem impulsionado avanços significativos na pesquisa em computação quântica com átomos neutros nos últimos anos [10, 11].

Essa correspondência direta entre a topologia física dos processadores quânticos baseados em átomos de Rydberg e a linguagem matemática dos grafos evidencia o papel central dessas estruturas na formulação e resolução de problemas de otimização combinatória. A possibilidade de implementar grafos arbitrários por meio da disposição espacial e da interação controlada entre qubits torna explícita a conexão entre modelos abstratos da matemática discreta e sistemas físicos reais. Essa convergência entre teoria dos grafos, computação e fenômenos físicos reforça o caráter formativo desses conceitos, que extrapolam o domínio da pesquisa avançada e se alinham às diretrizes educacionais contemporâneas, nas quais os grafos são reconhecidos como ferramentas fundamentais para a modelagem, análise e resolução de problemas em diferentes contextos do conhecimento.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC), em sua versão mais recente, propõe que o Novo Ensino Médio seja estruturado a partir do desenvolvimento de competências gerais e da oferta de itinerários formativos, com o objetivo de promover uma aprendizagem mais integrada, contextualizada e alinhada às demandas contemporâneas da sociedade [12]. Nesse contexto, observa-se que os grafos aparecem de forma explícita e estruturante no Componente Curricular de Matemática, especialmente em eixos que dialogam diretamente com a modelagem de problemas reais e com o pensamento computacional. Em particular, os grafos são contemplados no eixo Pensamento Algébrico, cujo objeto de conhecimento envolve a representação e modelagem por meio de estruturas algébricas e combinatórias, incluindo sequências, matrizes, árvores e grafos [12]. Adicionalmente, no eixo Pensamento Computacional e Matemática Discreta, a

BNCC explicita habilidades relacionadas à resolução de problemas de organização, contagem e tomada de decisão, utilizando estruturas discretas como grafos e árvores, bem como a representação de processos por meio de fluxogramas e algoritmos.

Essas habilidades, apresentadas no Quadro 1, estão diretamente alinhadas aos eixos estruturantes propostos pela BNCC e fortalecem a abordagem de problemas baseados em teoria dos grafos, como é o caso do Conjunto Independente Máximo (*Maximum Independent Set* – MIS), uma propriedade combinatória fundamental. Esse conceito permite modelar situações reais por meio de estruturas discretas, favorecendo a compreensão e a aplicação das propriedades estruturais dos grafos em contextos concretos.

Embora a BNCC apresente os grafos como parte dos objetos de conhecimento da Matemática, o documento não especifica contextos tecnológicos ou aplicações contemporâneas que possam tornar esses conceitos mais concretos para os estudantes. Nesse sentido, a utilização de problemas reais de otimização combinatória constitui uma estratégia capaz de aproximar a teoria da prática, permitindo que estruturas discretas sejam exploradas em situações de interesse científico e tecnológico. Essa perspectiva encontra respaldo nas metodologias ativas e na aprendizagem baseada em problemas, favorecendo o desenvolvimento integrado das competências matemáticas, computacionais e investigativas previstas na BNCC.

Um exemplo didaticamente relevante consiste na modelagem do problema de posicionamento ótimo de painéis solares, no qual cada residência pode ser representada como um vértice de um grafo e as restrições espaciais, associadas às áreas de influência que não podem se sobrepor, são representadas por arestas. Nessa formulação, o objetivo consiste em identificar um conjunto independente máximo de vértices, maximizando o número de instalações viáveis sem conflitos de proximidade. Esse tipo de abordagem permite tratar, de forma acessível e contextualizada, conceitos abstratos da matemática discreta aplicados a problemas reais.

Nesse contexto, o problema do Conjunto Independente Máximo (MIS) constitui um excelente exemplo didático para integrar os conteúdos previstos na BNCC com

aplicações contemporâneas da Computação e da Física. O MIS é uma estratégia clássica em problemas de seleção sob restrições, envolvendo processos de tomada de decisão baseados em restrições locais que não podem ser simultaneamente satisfeitas [13].

Para complementar essa abordagem, é particularmente relevante introduzir algoritmos para a resolução do MIS, sejam eles exatos, aproximados ou heurísticos. Essa etapa favorece o desenvolvimento de habilidades associadas à programação e ao pensamento algorítmico, permitindo que os estudantes implementem soluções computacionais e compreendam as limitações e potencialidades dos métodos empregados.

Problemas de otimização com grafos podem ser explorados no ensino médio, técnico e superior na área de tecnologia, por meio de abordagens práticas e contextualizadas. Ao utilizar conceitos como conjuntos independentes máximos, árvores geradoras e caminhos mínimos, os estudantes entram em contato com algoritmos clássicos amplamente aplicados em cenários reais, como planejamento urbano, redes elétricas e sistemas de comunicação [13]. Com uma abordagem interdisciplinar e atual, torna-se possível integrar programação, estruturas de dados e aplicações em energia renovável, promovendo uma aprendizagem ativa e orientada à resolução de problemas do cotidiano.

Por fim, destaca-se que os conceitos de grafos e algoritmos associados são amplamente utilizados em diversas áreas do mundo contemporâneo, desde a engenharia de redes até a biotecnologia. Governos e grandes empresas empregam algoritmos baseados em grafos para otimizar sistemas de transporte público, redes elétricas e análise de dados em larga escala. Um exemplo emblemático é o algoritmo *PageRank*, desenvolvido pelo Google, que utiliza grafos para classificar páginas na internet [14]. Na área da saúde, grafos foram amplamente utilizados para modelar redes de contágio durante a pandemia de COVID-19 [15].

É justamente nessa perspectiva que se insere a proposta deste trabalho. Ao utilizar um problema clássico da teoria dos grafos – o Conjunto Independente Máximo (MIS) – como estudo de caso para introduzir conceitos de computação quântica baseada em átomos neutros, busca-se oferecer uma abordagem interdisciplinar que integra Matemática, Física e Computação. Dessa forma, o artigo não se limita à apresentação de uma aplicação em computação quântica, mas propõe um exemplo concreto de como tecnologias emergentes podem ser incorporadas ao ensino de estruturas discretas, contribuindo para aproximar conteúdos previstos na BNCC de aplicações científicas contemporâneas.

2. Conjunto Independente Máximo (MIS)

O problema do Conjunto Independente Máximo (Maximum Independent Set – MIS) é um dos problemas

centrais da teoria dos grafos e da otimização combinatória. Formalmente, dado um grafo não direcionado $G = (V, E)$, um subconjunto $S \subseteq V$ é denominado independente se não existem arestas conectando quaisquer pares de vértices em S . O objetivo do problema consiste em determinar o subconjunto independente de maior cardinalidade possível. Em sua forma mais geral, pode-se considerar a versão ponderada, na qual cada vértice possui um peso associado, e busca-se maximizar a soma dos pesos dos vértices selecionados [16].

Este problema pertence à classe dos problemas NP-difíceis, o que implica que, até o presente momento, não se conhece nenhum algoritmo capaz de resolvê-lo eficientemente para todas as instâncias [17, 18]. Problemas dessa natureza surgem em diversos contextos práticos, incluindo alocação de recursos, planejamento de redes, sistemas logísticos e seleção sob restrições espaciais [10, 19–21]. De forma geral, tais problemas caracterizam-se por apresentarem um espaço de busca que cresce exponencialmente com o tamanho da instância, tornando inviável a exploração exaustiva em cenários de grande escala [16].

Para modelar situações do mundo real como instâncias de MIS, os vértices do grafo podem representar entidades físicas ou abstratas, como antenas, sensores, ativos financeiros ou unidades habitacionais, enquanto as arestas representam relações de conflito ou restrições de coexistência. Nesse contexto, o problema consiste em selecionar o maior subconjunto de elementos que não apresentem conflitos entre si. Essa formulação permite interpretar o MIS como um problema de maximização sob restrições locais, com ampla aplicabilidade em sistemas reais.

No contexto da computação quântica baseada em átomos neutros, o MIS apresenta uma propriedade particularmente relevante: sua estrutura pode ser diretamente mapeada na configuração física do sistema. Nessa abordagem, cada vértice do grafo é associado a um átomo individual, enquanto as arestas são representadas por interações físicas entre os átomos, mediadas pelo fenômeno de bloqueio de Rydberg [22, 23].

Essa correspondência estabelece uma ponte direta entre um problema abstrato da teoria dos grafos e um sistema físico de muitos corpos. Em particular, configurações válidas do conjunto independente correspondem a estados do sistema em que átomos próximos não são excitados simultaneamente. Como consequência, o problema do MIS pode ser reformulado como um problema de minimização de energia, no qual o estado fundamental do Hamiltoniano do sistema codifica a solução desejada.

Nesse cenário, a dinâmica do sistema quântico substitui a busca algorítmica tradicional. Em vez de explorar explicitamente o espaço combinatório de soluções, o sistema evolui fisicamente sob a ação de um Hamiltoniano efetivo, convergindo para estados de menor energia que satisfazem as restrições impostas pelo problema.

Diferentes estratégias têm sido investigadas na literatura para explorar essa correspondência. Em particular,

abordagens baseadas em evolução adiabática têm sido amplamente utilizadas, nas quais o sistema é conduzido gradualmente de um estado inicial conhecido para um estado final cujo Hamiltoniano codifica o problema MIS [19, 24, 25]. Estudos experimentais recentes demonstraram a viabilidade dessa abordagem em processadores de átomos neutros. Bauer et al. [26], por exemplo, analisaram métodos baseados em interações de Rydberg para problemas de otimização, observando alta sobreposição com o estado fundamental em simulações e desempenho consistente em implementações experimentais.

Do ponto de vista físico, a implementação do MIS em sistemas de átomos neutros requer a configuração de uma rede óptica na qual cada átomo ocupa uma posição bem definida no espaço. A distância entre os átomos determina a presença ou ausência de interação efetiva, estabelecendo a conectividade do grafo. O bloqueio de Rydberg impõe uma restrição natural: átomos localizados dentro de um determinado raio não podem ser simultaneamente excitados. Essa restrição física corresponde exatamente à condição de independência do grafo.

A evolução do sistema é controlada por pulsos de laser que ajustam parâmetros como a frequência de Rabi e o detuning, permitindo guiar o sistema ao longo de um processo quase adiabático. Ao final dessa evolução, o sistema tende a ocupar estados de baixa energia que correspondem a configurações válidas do conjunto independente, sendo o estado fundamental associado ao MIS.

Dessa forma, a resolução do problema deixa de ser uma tarefa puramente computacional e passa a ser interpretada como um processo físico de minimização de energia em um sistema quântico. Essa mudança de paradigma constitui um dos principais diferenciais da computação quântica baseada em átomos neutros, especialmente para problemas de otimização combinatória com estrutura geométrica.

3. Átomos Neutros e Framework Bloqueio

A computação quântica baseada em átomos neutros tem se consolidado como uma das abordagens mais promissoras para a implementação de sistemas quânticos escaláveis. Nessa arquitetura, átomos individuais são aprisionados em pinças ópticas formadas por feixes de laser altamente focalizados, permitindo o controle preciso de suas posições em arranjos bidimensionais ou tridimensionais [8, 9]. Essa capacidade de manipulação espacial constitui um diferencial fundamental, especialmente para a resolução de problemas cuja estrutura pode ser representada por grafos geométricos ilustrados na Figura 4.

Um dos fenômenos centrais explorados nessa plataforma é o bloqueio de Rydberg, no qual a excitação de um átomo para um estado de alta energia impede

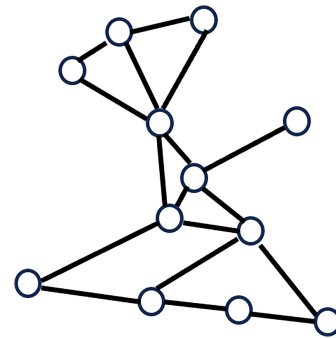


Figura 4: Modelagem conceitual como um grafo. Adaptado de [25, 27].

a excitação simultânea de átomos vizinhos dentro de um determinado raio. Esse efeito introduz uma restrição natural de exclusão espacial, que pode ser diretamente associada à condição de independência em grafos, como pode ser observado na Figura 5.

A implementação física desses sistemas é realizada por meio de pinças ópticas que aprisionam os átomos em posições pré-definidas, permitindo a construção de arranjos altamente configuráveis ilustrados na Figura 6.

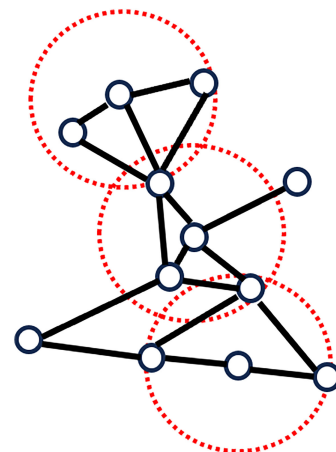


Figura 5: Representação do bloqueio de Rydberg e da região de exclusão. Adaptado de [25, 27].

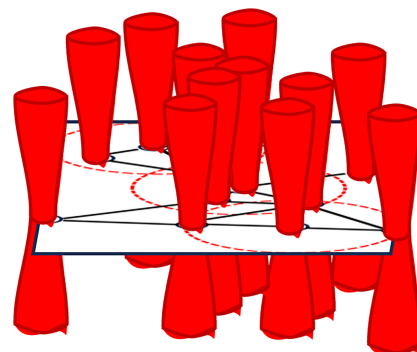


Figura 6: Pinças ópticas utilizadas para o aprisionamento e organização dos átomos. Adaptado de [25, 27].

A dinâmica do sistema é descrita por um Hamiltoniano efetivo que incorpora tanto os termos de excitação coerente quanto as interações entre átomos. No contexto de sistemas de átomos de Rydberg, esse Hamiltoniano pode ser escrito como:

$$H_{\text{Ryd}} = \sum_v \frac{\Omega_v}{2} \sigma_v^x - \sum_v \Delta_v n_v + \sum_{v < w} V_{\text{Ryd}}(|\vec{r}_v - \vec{r}_w|) n_v n_w, \quad (1)$$

onde $\vec{r}_v$ representa a posição do átomo v , σ_v^x é o operador de transição entre estados internos, e n_v é o operador número que indica se o átomo está no estado de Rydberg. Os parâmetros Ω_v e Δ_v correspondem, respectivamente, à frequência de Rabi e ao detuning do laser. O termo de interação é tipicamente modelado por um potencial de van der Waals:

$$V_{\text{Ryd}}(r) = \frac{C_6}{r^6}. \quad (2)$$

Esse termo introduz uma penalidade energética para configurações em que átomos próximos estão simultaneamente excitados, originando o bloqueio de Rydberg. Como consequência, os estados de menor energia do sistema correspondem a configurações que respeitam a restrição de independência, estabelecendo uma conexão direta com o problema do MIS [25, 27, 28].

A evolução do sistema pode ser conduzida por meio de protocolos quase adiabáticos, nos quais os parâmetros do Hamiltoniano são ajustados gradualmente ao longo do tempo. Nesse regime, o sistema evolui de um estado inicial conhecido para um estado final cujo Hamiltoniano codifica o problema de interesse. O estado fundamental dessa configuração corresponde, idealmente, à solução do problema de otimização, como pode ser observado na Figura 7.

Do ponto de vista computacional, a modelagem e simulação desses sistemas são viabilizadas por frameworks

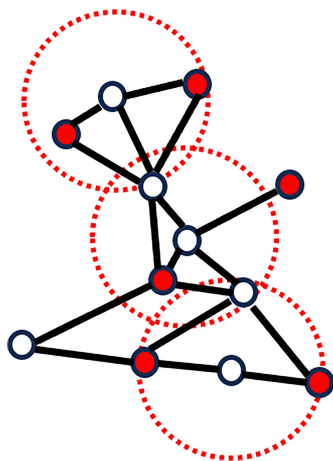


Figura 7: Evolução adiabática do sistema em direção ao estado fundamental. Adaptado de [25, 27].

especializados. Entre eles, destaca-se o Bloqade, um Software Development Kit (SDK) desenvolvido para a programação de sistemas de átomos neutros, disponível nas linguagens Python e Julia.

O Bloqade insere-se em uma classe de simuladores quânticos orientados a arquiteturas específicas, diferindo de simuladores tradicionais baseados em vetores de estado ou matrizes de densidade. Enquanto esses últimos buscam reproduzir a evolução completa de sistemas quânticos de forma geral, o Bloqade é projetado para capturar com fidelidade a dinâmica de sistemas físicos baseados em átomos de Rydberg, incorporando diretamente suas restrições e características experimentais [27].

A Figura 8 apresenta uma classificação dos principais simuladores e frameworks utilizados em computação quântica, organizando-os de acordo com a abordagem de modelagem empregada. Essa classificação evidencia que diferentes ferramentas são desenvolvidas para atender objetivos distintos, variando desde simuladores de propósito geral, capazes de reproduzir a evolução completa de estados quânticos, até plataformas especializadas voltadas para arquiteturas específicas de hardware ou domínios particulares de aplicação [27].

Observa-se que simuladores baseados em vetores de estado, matrizes de densidade, redes de tensores e formalismo de Clifford são amplamente utilizados para a implementação e validação de algoritmos em computadores quânticos digitais. Em contrapartida, frameworks específicos de plataforma, como o Bloqade, são desenvolvidos para representar com maior fidelidade a dinâmica física de arquiteturas particulares. No caso dos computadores quânticos baseados em átomos neutros, o Bloqade foi projetado para modelar diretamente as interações de Rydberg e a Simulação Hamiltoniana Analógica (Analog Hamiltonian Simulation – AHS), permitindo que problemas de otimização sejam implementados a partir da própria dinâmica física do sistema, em vez de circuitos compostos por portas lógicas discretas.

Conforme ilustrado na Figura 8, o Bloqade pertence à categoria de frameworks específicos de plataforma. O fluxo típico de desenvolvimento utilizando o Bloqade

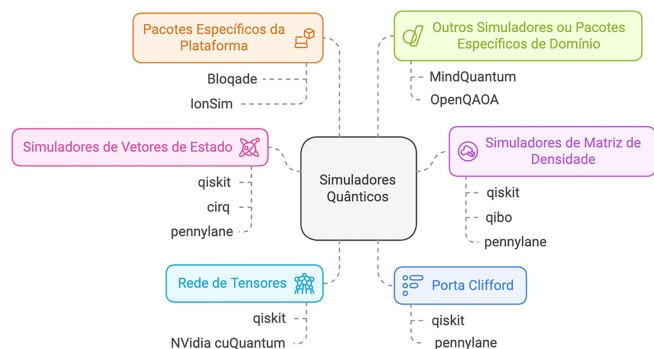


Figura 8: Classificação de simuladores quânticos por abordagem de modelagem. Adaptada de [27].

envolve inicialmente a definição da geometria do sistema, isto é, a posição dos átomos que representam os vértices do grafo. Em seguida, são configurados os parâmetros físicos do Hamiltoniano, incluindo frequência de Rabi, detuning e coeficientes de interação. A partir dessa configuração, o sistema pode ser simulado em ambientes clássicos ou executado em hardware quântico por meio de plataformas integradas, como o Amazon Braket.

Diferentemente de abordagens baseadas em circuitos quânticos, nas quais algoritmos são implementados como sequências discretas de portas lógicas, o Bloqueio opera no paradigma de Simulação Hamiltoniana Analógica (Analog Hamiltonian Simulation – AHS). Nesse modelo, o problema é codificado diretamente na dinâmica física do sistema, e sua solução emerge da evolução natural do Hamiltoniano.

Essa característica torna o framework particularmente adequado para problemas como o MIS, nos quais existe uma correspondência direta entre a estrutura do grafo e as interações físicas entre qubits. Como consequência, a resolução do problema deixa de depender exclusivamente de algoritmos explícitos e passa a explorar a própria física do sistema como mecanismo computacional.

4. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho tem como objetivo estabelecer uma ponte consistente entre a modelagem de um problema de otimização combinatória e sua implementação em um sistema de computação quântica baseado em átomos neutros. Para isso, o fluxo metodológico foi estruturado em algumas etapas principais: (i) modelagem do problema como um grafo do tipo unit-disk, (ii) mapeamento do grafo para um sistema físico de átomos de Rydberg, (iii) parametrização do Hamiltoniano do sistema, (iv) simulação da evolução dinâmica e (v) pós-processamento dos resultados. Essa estrutura permite separar claramente os níveis de abstração envolvidos – matemático, físico e computacional – garantindo coerência entre a formulação do problema e sua implementação no framework Bloqueio. Adicionalmente, com o objetivo de validar a consistência e a qualidade das soluções obtidas pelo modelo quântico, também foram implementados (vi) métodos clássicos para resolução do problema MIS, permitindo uma análise comparativa entre os diferentes paradigmas computacionais empregados neste trabalho.

4.1. Modelagem do problema como grafo unit-disk

O problema de otimização considerado neste trabalho é formulado como uma instância do problema do Conjunto Independente Máximo (MIS), representado por um grafo não direcionado $G = (V, E)$. A construção do grafo baseia-se em um modelo geométrico do tipo unit-disk, no qual cada vértice $v \in V$ está associado a uma posição em um espaço bidimensional. Uma aresta $(u, v) \in E$

é definida sempre que a distância euclidiana entre os vértices u e v é inferior a um determinado raio R , isto é:

$$(u, v) \in E \iff \|\vec{r}_u - \vec{r}_v\| < R. \quad (3)$$

Esse modelo é amplamente utilizado para representar sistemas espaciais com restrições de proximidade, sendo particularmente adequado para aplicações físicas e redes geométricas [13, 29]. A partir dessa construção, o problema MIS consiste em selecionar o maior subconjunto de vértices tal que nenhum par selecionado esteja conectado por uma aresta, respeitando, portanto, as restrições espaciais impostas pelo grafo.

4.2. Mapeamento para sistema físico de átomos de Rydberg

Uma vez definido o grafo, realiza-se o mapeamento direto para um sistema físico de átomos neutros. Nesse processo, cada vértice $v \in V$ é associado a um átomo localizado na posição $\vec{r}_v$, preservando a geometria do grafo no arranjo espacial do sistema quântico. As arestas do grafo são implementadas implicitamente por meio das interações físicas entre os átomos. Em particular, o bloqueio de Rydberg impõe que átomos localizados dentro de um raio de bloqueio r_B não possam ser simultaneamente excitados. Essa condição corresponde diretamente à restrição de independência do grafo [22, 28].

Para garantir a consistência entre o modelo matemático e o sistema físico, é necessário estabelecer uma relação adequada entre o raio do grafo unit-disk R e o raio de bloqueio r_B . Essa relação é obtida por meio de um fator de escala geométrico, que permite mapear corretamente as distâncias do grafo para o regime físico do sistema. Esse procedimento assegura que a estrutura de conectividade do grafo seja fielmente representada pelas interações físicas entre os átomos.

4.3. Parametrização do Hamiltoniano do sistema

A dinâmica do sistema quântico é descrita por um Hamiltoniano efetivo que incorpora os termos de excitação e interação entre os átomos de Rydberg, conforme discutido na Seção 3. Os principais parâmetros físicos envolvidos são: frequência de Rabi (Ω), responsável pela excitação coerente dos átomos; detuning (Δ), que controla o deslocamento energético dos estados excitados; coeficiente de interação (C_6), associado ao potencial de van der Waals entre átomos.

O raio de bloqueio r_B pode ser estimado a partir da relação:

$$r_B \sim \left(\frac{C_6}{\Delta} \right)^{1/6}. \quad (4)$$

Esse parâmetro desempenha papel central na definição das interações efetivas do sistema, sendo ajustado de modo a reproduzir a estrutura do grafo unit-disk.

A escolha desses parâmetros segue diretrizes experimentais e teóricas reportadas na literatura, garantindo que a simulação permaneça dentro de regimes fisicamente realistas [25, 28, 30].

4.4. Simulação Hamiltoniana analógica (AHS)

A implementação computacional é realizada no paradigma de Simulação Hamiltoniana Analógica (Analog Hamiltonian Simulation – AHS), no qual o problema é codificado diretamente no Hamiltoniano do sistema, ao invés de ser decomposto em portas lógicas discretas. A simulação é conduzida utilizando o framework Bloqade em conjunto com o ambiente Amazon Braket, permitindo a execução em simuladores clássicos ou, potencialmente, em hardware quântico real.

O protocolo de execução segue três etapas principais: inicialização do sistema em um estado de referência simples (tipicamente o estado fundamental trivial); evolução temporal controlada, na qual os parâmetros $\Omega(t)$ e $\Delta(t)$ são ajustados gradualmente; medição do estado final, produzindo amostras das configurações do sistema.

Durante a evolução, o sistema é conduzido de forma quase adiabática, de modo que permaneça próximo ao estado fundamental instantâneo do Hamiltoniano. Ao final do processo, espera-se que o sistema atinja uma configuração correspondente a um conjunto independente de grande cardinalidade [19, 24].

4.5. Pós-processamento e validação das soluções

Devido à natureza probabilística da medição quântica e às limitações práticas do modelo, os resultados obtidos consistem em múltiplas amostras de configurações possíveis do sistema. Assim, é necessário realizar um pós-processamento dos resultados com os seguintes objetivos: verificação da validade das soluções, garantindo que as configurações obtidas correspondam a conjuntos independentes; correção de violações residuais, por meio da remoção de vértices conflitantes; análise estatística das soluções, incluindo distribuição de cardinalidade e frequência de ocorrência.

Esse procedimento permite extrair, a partir das amostras geradas, as melhores soluções candidatas ao MIS, além de avaliar a robustez do método frente a ruídos e imperfeições da simulação.

4.6. Métodos clássicos utilizados

Para avaliar de forma consistente o desempenho do modelo quântico proposto, foram consideradas três abordagens clássicas para resolução do problema do Conjunto Independente Máximo. Essas abordagens permitem comparar diferentes paradigmas computacionais aplicados à mesma instância do problema.

4.6.1. Programação linear inteira (ILP) – abordagem exata

Nesta abordagem, o problema do MIS é formulado como um problema de otimização inteira binária. Cada vértice do grafo é associado a uma variável binária $x_i \in \{0, 1\}$, indicando se o vértice pertence ao conjunto independente. O modelo matemático é:

Função objetivo:

$$\max \sum_{i \in V} x_i. \quad (5)$$

Restrições de independência:

$$x_u + x_v \leq 1 \forall (u, v) \in E. \quad (6)$$

Ou seja, dois vértices conectados por uma aresta não podem ser selecionados simultaneamente. No código, como mostrado no ANEXO B, essa formulação foi implementada via PuLP, que faz a modelagem do problema, enquanto o solver CBC resolve o sistema de forma exata. Como se trata de um método determinístico de busca exaustiva com poda inteligente, ele garante a obtenção da solução ótima global.

4.6.2. Heurística gulosa + busca local

Diferentemente da ILP, esta abordagem não garante otimalidade, mas busca uma solução de boa qualidade com custo computacional reduzido. Ela é composta por duas etapas:

Heurística Gulosa (menor grau): Seleciona iterativamente o vértice de menor grau no subgrafo restante, removendo-o e excluindo seus vizinhos. Essa estratégia privilegia vértices com menor conflito.

Busca Local (trocas 1-por-2): Após a solução inicial, o algoritmo tenta melhorar o conjunto removendo um vértice e adicionando dois ou mais vértices compatíveis entre si. Essa etapa refina a solução e pode superar limitações da escolha puramente gulosa.

Embora não haja garantia teórica de otimalidade, essa combinação de greedy + local search frequentemente produz soluções próximas da ótima em grafos de porte moderado.

4.6.3. CP-SAT (Programação por restrições + SAT)

A terceira abordagem utiliza o solver CP-SAT do Google OR-Tools, que combina técnicas de programação por restrições com métodos de satisfatibilidade booleana (SAT). O modelo é semelhante ao da ILP, contém variáveis booleanas associadas a cada vértice, possui restrições $x_u + x_v \leq 1$ para cada aresta e tem função objetivo maximizando o número de vértices escolhidos. No entanto, o CP-SAT utiliza estratégias modernas de propagação de restrições e busca combinatória altamente otimizadas. Assim como a ILP, essa abordagem garante a solução ótima, desde que o solver tenha tempo suficiente.

Quadro 2: Parâmetros físicos utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor
Coefficiente de interação C6	5.4×10^{-24}
Detuning final Δ_{final}	20×10^6
Modelo de simulação	Analog Hamiltonian Simulation (AHS)
Raio unit-disk	140
Plataforma computacional	Bloqade + Amazon Braket

restrição física de exclusão entre átomos próximos. Esse mecanismo permite representar naturalmente as restrições de independência do grafo no sistema físico. Após a configuração do arranjo de átomos e do Hamiltoniano efetivo, o sistema foi submetido à evolução quase adiabática, conduzindo o estado quântico em direção a configurações de baixa energia associadas ao MIS. Os resultados obtidos pela abordagem quântica e sua comparação com métodos clássicos são apresentados na seção seguinte.

6. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos demonstram que diferentes paradigmas computacionais podem convergir para soluções equivalentes do problema do Conjunto Independente Máximo (MIS), embora utilizando mecanismos de busca substancialmente distintos. Nesse contexto, a comparação entre métodos clássicos e a abordagem quântica baseada em átomos de Rydberg permite avaliar não apenas a qualidade das soluções encontradas, mas também as diferenças estruturais entre os modelos computacionais empregados.

As Figuras 11, 12 e 13 apresentam os conjuntos independentes encontrados pelas abordagens clássicas utilizadas neste trabalho, incluindo Programação Linear Inteira (ILP), heurística gulosa combinada com busca local e Programação por Restrições (CP-SAT). Observa-se que, apesar das diferenças algorítmicas entre os

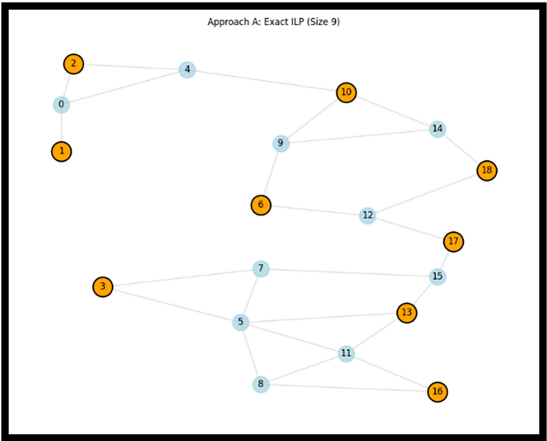


Figura 11: Solução do MIS para o método clássico ILP. Abordagem A no código.

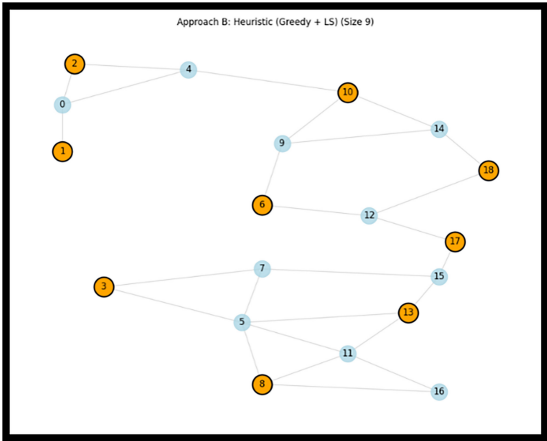


Figura 12: Solução do MIS para o método clássico Greedy e LS. Abordagem B no código.

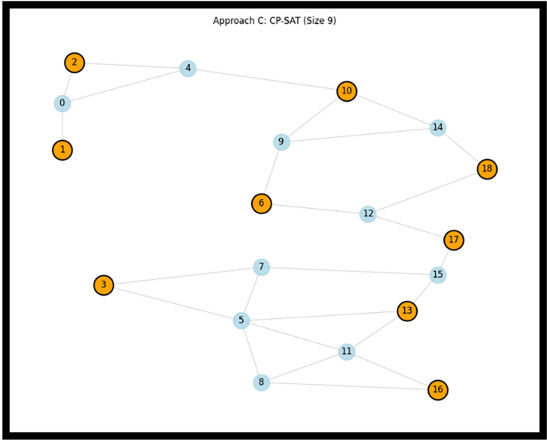


Figura 13: Solução do MIS para o método clássico CP-SAT. Abordagem C no código.

métodos, todos convergiram para soluções de mesma cardinalidade, evidenciando a consistência da modelagem adotada para a instância considerada.

O Quadro 3 apresenta uma comparação quantitativa entre os métodos clássicos e o modelo quântico implementado por meio de Simulação Hamiltoniana Analógica (AHS).

Os métodos clássicos exatos identificaram uma solução ótima contendo 9 vértices mutuamente independentes.

Quadro 3: Comparação entre os métodos utilizados.

Método	Natureza	Garantia de Otimalidade	Tamanho da solução
ILP	Exato (Otimização Inteira)	Sim	9
Heurística	Aproximado	Não	9
CP-SAT	Exato (CP + SAT)	Sim	9
Quântico (Rydberg)	Analógico	Não	9



Figura 14: Proposta de posicionamento dos painéis solares.

A abordagem heurística, apesar de não possuir garantia teórica de otimalidade, também convergiu para uma solução de mesma cardinalidade, embora utilizando uma composição diferente de vértices. Da mesma forma, o modelo quântico baseado em átomos de Rydberg também encontrou uma solução contendo 9 vértices válidos. A Figura 14 apresenta a configuração final obtida pelo modelo quântico, destacando as residências selecionadas para instalação dos painéis solares sem ocorrência de conflitos de proximidade.

Os resultados obtidos demonstram que tanto os métodos clássicos quanto o modelo quântico baseado em átomos de Rydberg foram capazes de identificar soluções contendo 9 vértices mutuamente independentes para a instância analisada. Esse resultado evidencia a consistência entre a modelagem clássica do problema e sua implementação física por meio do sistema de átomos neutros.

Embora os métodos empregados sejam fundamentados em paradigmas computacionais substancialmente distintos, todos convergiram para soluções de mesma cardinalidade, indicando que a formulação Hamiltoniana adotada representou adequadamente as restrições geométricas associadas ao problema do Maximum Independent Set (MIS). A equivalência entre a solução obtida pelo modelo quântico e o ótimo clássico evidencia que a dinâmica evolutiva do sistema foi capaz de conduzir o estado quântico para configurações fisicamente válidas associadas ao estado fundamental do Hamiltoniano do problema. Esse resultado torna-se particularmente relevante considerando as limitações práticas inerentes aos dispositivos quânticos atuais, tais como ruído experimental, efeitos de decoerência e imperfeições no

Quadro 4: Comparação conceitual entre abordagens clássicas e quânticas.

Aspecto	Clássico	Quântico (Rydberg)
Representação do problema	Variáveis e equações simbólicas	Interações físicas entre qubits
Busca pela solução	Exploração algorítmica explícita do espaço combinatório	Evolução física para estados de menor energia
Complexidade	Crescimento exponencial do espaço de busca	Exploração paralela de superposições de estados
Natureza da solução	Determinística ou heurística	Análoga baseada em dinâmica quântica

controle dos pulsos de laser e das interações físicas entre os átomos [31, 32]. Em implementações ideais, a evolução adiabática do Hamiltoniano conduziria o sistema diretamente ao estado fundamental correspondente ao MIS. Entretanto, em cenários experimentais reais, tais limitações podem induzir desvios na dinâmica quântica, levando o sistema a estados próximos do ótimo global, ainda que não necessariamente à solução ótima exata. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram a robustez do modelo quântico proposto, uma vez que mesmo na presença de ruídos e imperfeições experimentais foi possível alcançar soluções equivalentes às obtidas por métodos clássicos. Do ponto de vista conceitual, os resultados evidenciam uma diferença fundamental entre os paradigmas clássico e quântico. Métodos clássicos realizam uma busca explícita no espaço combinatório de soluções, explorando algorítmicamente diferentes configurações possíveis até encontrar a solução ótima ou aproximada. Em contraste, o sistema quântico explora diretamente a dinâmica física do Hamiltoniano, permitindo que a evolução natural do sistema conduza a estados de menor energia associados ao problema.

Nesse contexto, torna-se relevante analisar não apenas os resultados quantitativos, mas também as diferenças conceituais entre os modelos computacionais empregados. O Quadro 4 apresenta uma comparação entre os principais aspectos relacionados à representação do problema, à estratégia de busca e à natureza computacional das abordagens clássicas e quânticas.

Embora os resultados obtidos neste trabalho tenham sido avaliados em instâncias de pequena escala, o modelo quântico baseado em átomos neutros demonstrou capacidade de produzir soluções equivalentes às obtidas por métodos clássicos, mesmo na presença de ruídos e limitações experimentais. Esses resultados reforçam o potencial da abordagem para aplicações em problemas combinatórios geometricamente estruturados. Além disso, a arquitetura baseada em átomos neutros apresenta características particularmente promissoras para futuras aplicações em sistemas de maior escala [33–35], especialmente devido à capacidade de mapear

diretamente a estrutura do grafo em interações físicas entre qubits, diferenciando-se de abordagens digitais convencionais e favorecendo a representação natural de problemas geométricos complexos.

Além disso, diferentemente de métodos baseados em portas lógicas discretas, a computação quântica analógica explora diretamente a física do sistema para representar o problema. Nesse contexto, o problema de otimização não é apenas modelado matematicamente, mas incorporado ao Hamiltoniano físico do dispositivo. Essa correspondência direta entre modelo matemático e sistema físico constitui uma das principais motivações para o estudo de arquiteturas baseadas em átomos de Rydberg.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial de escalabilidade das arquiteturas baseadas em átomos neutros para a resolução de problemas de otimização combinatória. Métodos clássicos exatos aplicados ao problema do Conjunto Independente Máximo (MIS) apresentam crescimento exponencial do custo computacional à medida que o tamanho do grafo aumenta [17, 18], tornando-se rapidamente inviáveis para instâncias de grande porte. Em contrapartida, abordagens quânticas exploram propriedades intrínsecas da mecânica quântica, como superposição e emaranhamento, permitindo a exploração simultânea de múltiplas configurações do espaço de soluções. Embora ainda não exista uma demonstração geral de vantagem exponencial para o problema MIS em arquiteturas quânticas atuais, diversos trabalhos apontam o potencial desses sistemas para reduzir o custo prático de exploração combinatória em classes específicas de problemas [33–35]. Nesse contexto, o algoritmo Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), proposto por Farhi, Goldstone e Gutmann [36], representa um marco importante ao demonstrar como estados quânticos parametrizados podem ser utilizados para investigar eficientemente regiões relevantes do espaço de busca em problemas de otimização.

Apesar desse potencial, algumas limitações ainda devem ser consideradas. Os atuais processadores de átomos neutros, embora já permitam a manipulação de centenas de qubits físicos, ainda dependem de avanços relacionados à fidelidade das operações, ao controle preciso dos pulsos de laser, ao tempo de coerência e à conectividade efetiva entre os átomos. Além disso, o processo de mapeamento entre a geometria do problema e o arranjo físico dos átomos pode impor restrições à representação de grafos arbitrários, tornando essa arquitetura particularmente adequada para problemas com estrutura geométrica ou interações locais. Por outro lado, o rápido avanço dos processadores de átomos neutros e o aumento contínuo do número de qubits controláveis indicam uma perspectiva promissora de escalabilidade dessa tecnologia [19, 33]. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram esse cenário ao demonstrar que a abordagem proposta foi capaz de reproduzir a solução ótima para a instância analisada, reforçando o potencial da computação quântica analógica como uma

alternativa complementar aos métodos clássicos para a resolução de problemas de otimização combinatória.

7. Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma abordagem baseada em computação quântica com átomos neutros para a resolução de um problema real de otimização espacial relacionado ao posicionamento de painéis solares compartilhados em uma região residencial do estado de São Paulo. O problema foi modelado como uma instância do Conjunto Independente Máximo (MIS), permitindo estabelecer uma correspondência direta entre a estrutura matemática do grafo e a dinâmica física de um sistema de átomos de Rydberg.

A utilização do framework Bloqade em conjunto com o paradigma de Simulação Hamiltoniana Analógica (AHS) possibilitou representar fisicamente as restrições espaciais do problema por meio do mecanismo de bloqueio de Rydberg. Nesse contexto, a evolução adiabática do sistema conduziu o Hamiltoniano em direção a estados de baixa energia associados ao conjunto independente máximo do grafo.

Os resultados demonstraram que os métodos clássicos exatos empregados neste trabalho, Programação Linear Inteira (ILP) e CP-SAT, foram capazes de encontrar a solução ótima contendo 9 vértices mutuamente independentes. A abordagem heurística baseada em Greedy e Busca Local também convergiu para uma solução de mesma cardinalidade, evidenciando a robustez da instância analisada.

De maneira consistente, o modelo quântico baseado em átomos de Rydberg também identificou uma solução contendo 9 vértices válidos para a instância considerada. Esse resultado evidencia que a formulação Hamiltoniana adotada foi capaz de representar adequadamente as restrições geométricas do problema, conduzindo o sistema a uma configuração correspondente ao MIS do grafo analisado.

Embora a instância considerada neste trabalho seja de pequeno porte, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da computação quântica analógica para problemas de otimização espacial modelados por grafos geométricos. Nesse contexto, arquiteturas baseadas em átomos neutros apresentam potencial particularmente relevante para aplicações futuras envolvendo sistemas maiores e com elevada complexidade combinatória.

Além disso, a correspondência natural entre grafos geométricos e interações locais em sistemas de Rydberg torna essa tecnologia particularmente adequada para aplicações envolvendo redes físicas, planejamento urbano, logística e problemas espaciais com restrições de proximidade.

Embora a tecnologia de computação quântica baseada em átomos neutros ainda esteja em estágio inicial de desenvolvimento, os resultados apresentados demonstram que essa abordagem já é capaz de reproduzir soluções

ótimas em problemas reais de otimização combinatória. Dessa forma, arquiteturas fundamentadas em bloqueio de Rydberg apresentam-se como uma alternativa promissora para aplicações futuras envolvendo problemas geométricos de larga escala, especialmente em cenários nos quais métodos clássicos exatos enfrentam limitações computacionais significativas.

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo. Anexos A e B.

Referências

- [1] R.P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* **21**, 467 (1982).
- [2] D. Deutsch, *Proc. R. Soc. London A* **400**, 97 (1985).
- [3] J. Clarke e F.K. Wilhelm, *Nature* **453**, 1031 (2008).
- [4] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J.C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F.G.S.L. Brandão, D.A. Buell *et al.*, *Nature* **574**, 505 (2019).
- [5] R. Blatt e D. Wineland, *Nature* **453**, 1008 (2008).
- [6] D. Loss e D.P. DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **57**, 120 (1998).
- [7] H.S. Zhong, H. Wang, Y.H. Deng, M.C. Chen, L.C. Peng, Y.H. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu *et al.*, *Science* **370**, 1460 (2020).
- [8] D.S. Weiss e M. Saffman, *Quantum Computing with Neutral Atoms*, *Physics Today* **70**, 44 (2017).
- [9] M. Kim, J. Ahn, Y. Song, J. Moon e H. Jeong, *J. Korean Phys. Soc.* **82**, 827 (2023).
- [10] O. Ezratty, *Understanding Quantum Technology*, disponível em: <https://www.oezratty.net/wordpress/2024/understanding-quantum-technologies-2024/>.
- [11] S. Ebadi, T.T. Wang, H. Levine, A. Keesling, G. Semeghini, A. Omran, D. Bluvstein, R. Samajdar, H. Pichler, W.W. Ho *et al.*, *Nature* **595**, 227 (2021).
- [12] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, *Base Nacional Comum Curricular*, disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/>.
- [13] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest e C. Stein, *Introduction to Algorithms* (MIT Press, Cambridge, 2009), 3 ed.
- [14] S. Brin e L. Page, *The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine*, disponível em: <https://snap.stanford.edu/class/cs224w-readings/Brin98Anatomy.pdf>.
- [15] R. Alguliyev, R. Aliguliyev e F. Yusifov, *Infectious Disease Modelling* **6**, 112 (2021).
- [16] C.E. Leiserson, R.L. Rivest, C. Stein e T.H. Cormen, *Introduction to Algorithms* (MIT Press & McGraw-Hill, Cambridge, 2001), 2 ed.
- [17] R.M. Karp, em: *Complexity of Computer Computations*, editado por R.E. Miller e J.W. Thatcher (Plenum Press, New York, 1972).
- [18] R.E. Tarjan e A.E. Trojanowski, *SIAM J. Comput.* **6**, 537 (1977).
- [19] S. Ebadi, A. Keesling, M. Cain, T.T. Wang, H. Levine, D. Bluvstein, G. Semeghini, A. Omran, J. Liu, R. Samajdar *et al.*, *Science* **376**, 1209 (2022).
- [20] H. Pichler, S.T. Wang, L. Zhou, S. Choi e M.D. Lukin, *arXiv:1808.10816* (2018).
- [21] S. Jeong, M. Kim, M. Hhan, J. Park e J. Ahn, *Phys. Rev. Research* **5**, 043037 (2023).
- [22] B.F. Schiffer, D.S. Wild, N. Maskara, M. Cain, M.D. Lukin e R. Samajdar, *Phys. Rev. Research* **6**, 013271 (2024).
- [23] J. Wurtz, P.L.S. Lopes, C. Gorgulla, N. Gemelke, A. Keesling e S. Wang, *arXiv:2205.08500* (2024).
- [24] M. Cain, S. Chattopadhyay, J.G. Liu, R. Samajdar, H. Pichler e M.D. Lukin, *arXiv:2306.13123v2* (2023).
- [25] H. Yeo, H.E. Kim e K. Jeong, *Adv. Quantum Technol.* **8**, 2400291 (2025).
- [26] N. Bauer, K. Yeter-Aydeniz, E. Kokkas e G. Siopsis, *arXiv:2404.11440* (2024).
- [27] P. Kitson, T. Haug, A. La Magna, O. Morsch e L. Amico, *Phys. Rev. A* **110**, 043304 (2024).
- [28] M.T. Nguyen, J.G. Liu, J. Wurtz, M.D. Lukin, S.T. Wang e H. Pichler, *PRX Quantum* **4**, 010331 (2023).
- [29] R.S. Andrist, M.J.A. Schuetz, P. Minssen, R. Yalovetzky, S. Chakrabarti, D. Herman, N. Kumar, G. Salton, R. Shaydulin, Y. Sun *et al.*, *Phys. Rev. Research* **5**, 043277 (2023).
- [30] K. Kim, M. Kim, J. Park, A. Byun e J. Ahn, *Sci. Data* **11**, 111 (2024).
- [31] H. Bernien, S. Schwartz, A. Keesling, H. Levine, A. Omran, H. Pichler, S. Choi, A.S. Zibrov, M. Endres, M. Greiner *et al.*, *Nature* **551**, 579 (2017).
- [32] M. Saffman, T.G. Walker e K. Mølmer, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2313 (2010).
- [33] A. Browaeys e T. Lahaye, *Nat. Phys.* **16**, 132 (2020).
- [34] P. Schauß, M. Cheneau, M. Endres, T. Fukuhara, S. Hild, A. Omran, T. Pohl, C. Gross, S. Kuhr e I. Bloch, *Nature* **491**, 87 (2012).
- [35] H. Levine, A. Keesling, G. Semeghini, A. Omran, T.T. Wang, S. Ebadi, H. Bernien, M. Greiner, V. Vuletić *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 170503 (2019).
- [36] E. Farhi, J. Goldstone e S. Gutmann, *arXiv:1411.4028* (2014).