

ReqRoute: Protocolo de Roteamento por Reforço para Redes de Entrelaçamento Quântico

Diego Abreu¹, Arthur Pimentel¹, Antônio Abelém¹

¹ Universidade Federal do Pará - UFPA

Abstract. *Quantum Internet aims to enable quantum communication between any two points, offering applications such as quantum key distribution (QKD), distributed quantum computing, and entanglement networks. However, the current quantum technology presents challenges with low entanglement (EPR pairs) generation rates, limited quantum memory capacity, and decoherence rates that often lead to unusable EPR pairs due to low fidelity. This presents a significant challenge for tasks such as routing. In this paper, we tackle this challenge by introducing ReqRoute, a quantum-aware routing protocol that utilizes reinforcement learning to optimize quantum routing decisions. We show that ReqRoute consistently outperforms traditional methods by maintaining higher fidelity routes in different network configuration scenarios.*

Resumo. *A Internet Quântica tem como objetivo possibilitar a comunicação quântica entre múltiplos pontos da rede, oferecendo aplicações como a distribuição quântica de chaves (QKD), computação quântica distribuída e as redes de entrelaçamento. No entanto, a tecnologia de comunicação quântica atual apresenta desafios significativos, com baixas taxas de geração de entrelaçamento (pares EPR), capacidade de memória quântica limitada e taxas de decoerência que frequentemente resultam em pares EPR inutilizáveis devido à baixa fidelidade. Isso representa um desafio significativo para tarefas como o roteamento. Neste artigo, é proposto o ReqRoute, um protocolo baseado em aprendizado por reforço para otimizar as decisões de roteamento em redes de entrelaçamento quântico. Demonstrou-se que o ReqRoute supera consistentemente métodos tradicionais, mantendo rotas de maior fidelidade em diversos cenários de configuração de rede.*

1. Introdução

A Internet Quântica é uma área de pesquisa em rápido crescimento que visa transformar a transmissão e processamento da informação, tornando-a mais segura [Kozłowski et al. 2023]. Ao possibilitar a comunicação quântica entre múltiplos nós da rede, a Internet Quântica oferece aplicações promissoras, como a distribuição quântica de chaves (*Quantum Key Distribution* - QKD), a computação quântica distribuída [Cuomo et al. 2020] e a criação de redes de entrelaçamento [Nötzel and DiAdamo 2020]. Essas aplicações têm o potencial de transformar a segurança da comunicação e a capacidade de processamento de informações, desempenhando um papel fundamental na próxima geração de tecnologias de comunicação e computação [Abelém et al. 2020].

No entanto, a realização prática da Internet Quântica enfrenta desafios significativos. A tecnologia quântica disponível atualmente apresenta limitações relacionadas

às taxas de geração dos entrelaçamentos (pares EPR - *Einstein-Podolsky-Rosen pairs*), a capacidade limitada de qubits (bits quânticos) disponíveis em cada nó, e a decoerência (*quantum decoherence*) que frequentemente resulta em pares EPR e qubits de baixa qualidade, devido à perda da coerência dos estados quânticos, a fidelidade. Essas limitações têm um impacto direto na eficácia das operações realizadas em redes quânticas, em particular no roteamento de informações [Gyongyosi et al. 2018].

Na camada de rede, o roteamento de informações quânticas em redes de entrelaçamento quântico representa um grande desafio [Gyongyosi and Imre 2020, Pant et al. 2019, Chakraborty et al. 2019]. Diferentemente das redes clássicas (não quânticas), a informação quântica codificada no qubit não pode ser copiada e encaminhada (devido ao teorema da não-clonagem quântica), e depende de operações específicas da comunicação quântica para ser transmitida. Assim, a informação quântica deve percorrer rotas complexas enquanto preserva a fidelidade, consumindo menos recursos possível. O roteamento eficiente e confiável de informações é um componente essencial para o funcionamento eficaz de qualquer rede de comunicação, incluindo redes quânticas [Abreu et al. 2022].

Para enfrentar esses desafios, este artigo apresenta o protocolo ReqRoute, um protocolo de roteamento quântico que utiliza a técnica de aprendizado por reforço para otimizar as decisões de roteamento em redes de entrelaçamento quântico. Será demonstrado que o ReqRoute supera consistentemente métodos de roteamento tradicionais, mantendo rotas de alta fidelidade em diferentes cenários de configuração de rede. Esta abordagem representa um avanço significativo na busca por soluções eficazes para a construção da Internet Quântica. Nesse contexto, as principais contribuições consistem em :

- Desenvolvimento do ReqRoute, uma abordagem por aprendizado por reforço para o roteamento em redes de entrelaçamento quântico.
- Análise do ReqRoute em dois cenários de rede, rede uniforme e rede com composição variável, com quatro configurações de rede.
- Comparação do ReqRoute com outros protocolos de roteamento para redes de entrelaçamento quântico disponíveis no estado da arte.

2. Comunicação Quântica

2.1. Fundamentos da Comunicação Quântica

A comunicação através de entrelaçamento quântico possui diversas aplicações, incluindo criptografia [Geddada and Lakshmi 2022], sensoriamento [Degen et al. 2017], e computação quântica cega (*Blind Quantum Computing*) [Broadbent et al. 2009]. Essas aplicações dependem da geração e distribuição de pares EPR através de canais quânticos, que transmitem estados quânticos como qubits. Esses canais podem utilizar fibras de telecomunicações ou espaço livre [Gyongyosi et al. 2018].

Os pares EPR são considerados o principal recurso de uma rede quântica. A geração de pares EPR geralmente é realizada através de fótons e qubits transdutores. Os fótons são utilizados para transportar os estados quânticos através dos canais quânticos, enquanto que a informação quântica é armazenada nos qubits transdutores compondo a memória quântica dos nós. Para realizar a geração de um par EPR entre dois nós da rede, o nó emissor entrelaça internamente um qubit da memória com outro qubit de transmissão, e o

envia através do canal quântico previamente existente entre os dois nós. No nó receptor, o qubit de transmissão é entrelaçado com o qubit da memória do receptor, gerando o par EPR entre os dois nós da rede. O resultado da operação é anunciado utilizando um canal clássico, como a Internet, indicando a criação ou não do par EPR [Kozłowski et al. 2023]. Dois aspectos fundamentais da comunicação quântica são a troca de informações quânticas através do protocolo de teletransporte quântico (*quantum teleportation*) e a troca de entrelaçamento (*entanglement swapping*), ambos ilustrados na Figura 1.

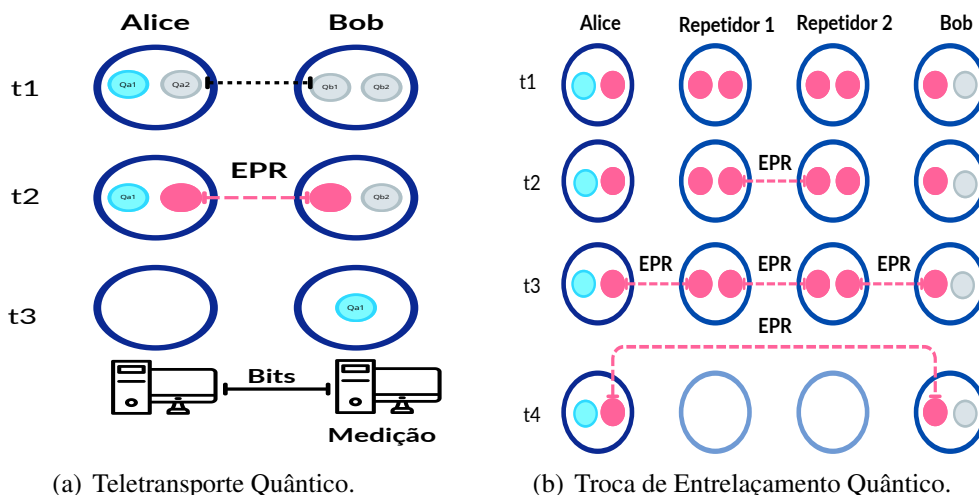


Figura 1. Funcionamento do Teletransporte e Troca de Entrelaçamento Quântico.

A Figura 1.a ilustra o processo de teletransporte quântico, um método para transmitir informações quânticas entre dois pontos específicos em uma rede, denominados ponto A (Alice) e ponto B (Bob). O processo começa com a criação de um par EPR, ligando um qubit em cada nó (Alice e Bob), como descrito no parágrafo anterior. Uma vez estabelecido o par EPR, Alice, que detém a informação a ser transmitida, entrelaça o qubit de transmissão com o seu qubit do par EPR e realiza uma medição de ambos os qubits. Este procedimento destrói o entrelaçamento inicial do par EPR, resultando em estados quânticos independentes em cada nó.

O ato de medir os qubits gera dois bits clássicos. Estes bits são então enviados por Alice à Bob através de um canal de comunicação clássico. Ao receber os bits, Bob executa correções (relativas aos quatro estados de Bell [Abelém et al. 2020]) no seu qubit do par EPR. A correção específica depende dos bits clássicos recebidos e transforma o qubit de Bob no estado quântico original que Alice precisa enviar. O processo requer essa comunicação de informação clássica, pois é essencial para a finalização bem-sucedida do teletransporte quântico. É importante destacar que esse processo está em conformidade com o teorema da não-clonagem, uma vez que o estado quântico original é consumido durante a operação [Kozłowski et al. 2023].

A Figura 1.b ilustra o processo de troca de entrelaçamento. Neste processo, Alice e Bob não possuem um par EPR entre si, e precisam realizar o processo de teletransporte, e para isso utilizam os nós intermediários como repetidores, os quais utilizam os pares EPR das suas conexões diretas para gerar um par EPR direto entre Alice e Bob. O processo começa com a geração de pares EPR entre os nós adjacentes. Assim, Alice compartilha

um par EPR com o repetidor 1, o repetidor 1 compartilha outro par EPR com o repetidor 2, e o repetidor 2, por sua vez, compartilha um terceiro par EPR com Bob.

O entrelaçamento é então trocado nos repetidores. No repetidor 1, uma operação de troca é realizada nos qubits do par que ele compartilha com Alice e do par que ele compartilha com o repetidor 2. Esta operação resulta no entrelaçamento dos qubits de Alice com um dos qubits no repetidor 2. Da mesma forma, no repetidor 2, uma operação semelhante é realizada, entrelaçando efetivamente o outro qubit do repetidor 2 com o qubit de Bob. Como resultado, o qubit de Alice e o qubit de Bob se tornam entrelaçados, apesar de nunca terem interagido diretamente um com o outro. Este processo de troca de entrelaçamento é essencial para estender o entrelaçamento quântico por longas distâncias em redes quânticas, possibilitando a comunicação quântica entre nós distantes.

Ambas as operações de geração de pares de EPR e de troca de entrelaçamento são processos com ruído e sujeitos a perda da coerência quântica (*quantum decoherence*), o que causa a degradação da fidelidade do estado. Assim, é necessário realizar o processo de purificação quântica (*quantum purification* ou *quantum distillation*), no qual é possível criar estados de pares de EPR de maior fidelidade a partir de dois ou mais pares de menor fidelidade. Nesse processo, os pares EPRs de menor fidelidade são consumidos, o que implica em um aumento no consumo de recursos da rede (qubits e EPRs).

2.2. Roteamento em Redes de Entrelaçamento Quântico

As redes de distribuição de entrelaçamento quântico têm como principal objetivo gerar e compartilhar pares EPR entre múltiplos nós da rede. Diferentemente das redes clássicas, que precisam transportar e encaminhar os dados ao longo da rede, na rede quântica, o estado quântico a ser transmitido não é inserido na rede. Portanto, a rede funciona produzindo os pares EPR entre os nós da rede, e atendendo às demandas de teletransporte e troca de entrelaçamento.

Desta forma, o roteamento clássico e o roteamento quântico diferem em vários aspectos, incluindo a representação da informação, os canais de comunicação utilizados, os algoritmos de roteamento empregados e os desafios e limitações enfrentados em cada paradigma. O problema de roteamento em uma rede quântica pode ser visto como a tarefa de encontrar a melhor ou mais eficiente rota para transferir informações quânticas de um nó remetente para um nó receptor. Essa tarefa envolve a seleção de nós intermediários e canais ao longo do caminho que atendam a requisitos específicos de cada aplicação, levando em consideração restrições como a disponibilidade de qubits e pares EPR.

Um dos requisitos para o estabelecimento bem-sucedido de uma rota em uma rede quântica é a disponibilidade de qubits. Para participar do processo de estabelecimento de uma rota, um nó deve ter pelo menos um qubit disponível. Essa exigência é devido a participação em operações como a troca de entrelaçamento e o teletransporte quântico. Além disso, os nós remetente e destinatário devem ter dois qubits disponíveis cada para realizar adequadamente o processo de teletransporte quântico. Outro requisito essencial é a disponibilidade de pares EPR. A rota deve ter pelo menos um par EPR disponível em todos os canais ao longo do caminho. Os pares EPR são o recurso base para a operação do teletransporte quântico, permitindo a transferência de estados quânticos entre os nós. Se não houver pares EPR disponíveis antecipadamente, é necessário criar esses pares nos canais existentes. Cada par EPR criado requer um qubit de cada nó envolvido na operação

de criação.

3. Trabalhos Relacionados

Diversas pesquisas investigam o desenvolvimento e as tendências atuais em redes quânticas, sobre diferentes perspectivas [Illiano et al. 2022, Hasan et al. 2023, Kumar et al. 2023, Caleffi et al. 2022]. Nessa seção, são apresentados trabalhos relacionados que abordam o roteamento em redes de entrelaçamento quântico. O trabalho de Van Meter et al. (2013) [Van Meter et al. 2013] é um dos primeiros trabalhos que abordam o roteamento quântico, propondo o qDijkstra, uma adaptação do algoritmo clássico de Dijkstra para o contexto de redes quânticas. No qDijkstra, a rota é escolhida de acordo com a quantidade de saltos entre os nós, considerando porém os requisitos como qubits disponíveis em cada nó da rota e de pares EPRS em cada canal. Em nosso trabalho, o qDijkstra será comparado à nossa proposta, ReqRoute, que considera outras métricas para escolher a melhor rota.

Neste contexto, várias métricas têm sido utilizadas para orientar as decisões de roteamento. Vários trabalhos consideram a fidelidade do canal como uma métrica importante na estratégia de roteamento [Li et al. 2021, Gyongyosi and Imre 2018, Pirker and Dür 2019]. A quantidade de pares EPR disponíveis também é usada como métrica de qualidade da rota [Patil et al. 2022, Chakraborty et al. 2019, Fischer and Towsley 2021]. Em relação à disponibilidade de qubits de memória em cada nó, variadas perspectivas têm sido adotadas. Por exemplo, Patil et al. (2021) [Patil et al. 2021] considera a disponibilidade infinita de qubits em memória em seu protocolo de roteamento. Outros trabalhos enfatizam a importância de se considerar a memória como um fator crítico [Nain et al. 2020]. Além disso, em Miguel-Ramiro et al. (2023) [Miguel-Ramiro et al. 2023] é proposta uma estratégia de roteamento que busca reduzir o consumo de qubits em memória, levando em consideração os efeitos da decoerência. De outro modo, nossa proposta considera tanto a fidelidade, como a quantidade de pares EPR disponíveis e a disponibilidade de memória para a escolha da melhor rota.

Métodos de Aprendizado de Máquina também têm sido aplicados no campo das redes de entrelaçamento quântico. Le et al. 2022 [Le and Nguyen 2022] propõem um protocolo de roteamento baseado em aprendizado por reforço. Entretanto, uma diferença fundamental em relação ao nosso trabalho é o objetivo. Enquanto a proposta de Le et al. (2022) se concentra em alocar o maior número possível de requisições simultaneamente, nossa proposta, o ReqRoute, visa identificar a rota mais eficiente para cada solicitação individual de entrelaçamento. Além disso, no estudo de Le et al. (2022), o algoritmo Dijkstra é utilizado para selecionar rotas, baseando-se primariamente no número de saltos entre os nós, sem considerar a qualidade da rota em termos de fidelidade. Assim, o modelo proposto leva em conta apenas a capacidade de qubits de cada nó e a quantidade de pares EPR disponíveis, sem incorporar a fidelidade do canal ou o impacto da decoerência. Esta abordagem resulta em um modelo que, embora útil, não reflete completamente as complexidades de uma rede quântica real, onde a fidelidade do canal e a decoerência são fatores críticos.

4. ReqRoute: Protocolo de Roteamento por Reforço para Redes Quânticas

O ReqRoute implementa uma adaptação do algoritmo *Q-Learning* [Kumar et al. 2020], uma técnica de aprendizado por reforço [Qiang and Zhongli 2011], para otimizar o roteamento em redes quânticas. Este método permite que o protocolo aprenda a tomar decisões baseando-se na experiência adquirida, sem a necessidade de um modelo previamente treinado. A estratégia do *Q-Learning* foi adotada por ser adequada para ambientes dinâmicos, como é o caso das redes quânticas. A Figura 2 ilustra a estratégia de aprendizado do ReqRoute. Como a Figura 2 apresenta, o ReqRoute possui os seguintes componentes:

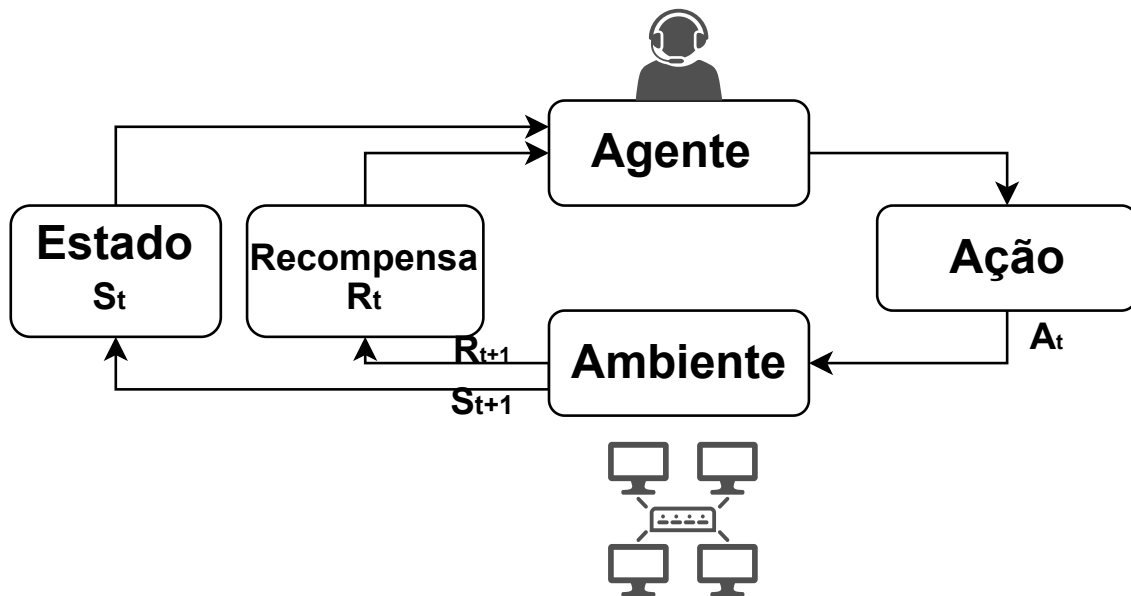


Figura 2. Funcionamento do ReqRoute.

- **Agente:** é o núcleo do sistema de aprendizado por reforço. Ele é responsável por tomar decisões com base nos dados que recebe do ambiente. No contexto do ReqRoute, o agente utiliza informações sobre o estado atual da rede para escolher a ação mais adequada, visando a otimização do roteamento.
- **Ambiente:** representa o sistema externo com o qual o agente interage. No caso, o ambiente é a própria rede quântica, incluindo todos os nós e seus qubits disponíveis, canais de comunicação, pares EPR disponíveis e a fidelidade dos canais. O ambiente fornece atualizações ao agente por meio de mudanças de estado e recompensas após cada ação tomada pelo agente.
- **Estado (S):** representa a configuração da rede em determinado momento, incluindo a fidelidade dos canais, a quantidade de pares EPR disponíveis e a disponibilidade de qubits em cada nó.
- **Ações (A):** as ações no ReqRoute incluem a escolha de diferentes rotas e a alocação de pares EPR para determinados links.
- **Recompensa (R):** é um retorno para o aprendizado. No ReqRoute, a recompensa é baseada na eficácia da ação tomada, como o aumento da fidelidade da rota ou a eficiência na utilização dos recursos da rede (usar menos qubits e menos pares EPRs).
- **Política (π):** define a estratégia que o agente segue para escolher a próxima ação com base no estado atual.

No ReqRoute, o objetivo é treinar o agente para aprender a selecionar rotas de comunicação que otimizem a transmissão de qubits, considerando métricas como fidelidade, disponibilidade de pares EPR e qubits disponíveis nos nós da rede. O Algoritmo 1 apresenta o funcionamento do ReqRoute, o qual opera da seguinte forma:

Algorithm 1 Algoritmo ReqRoute

- 1: **Entrada:** Topologia da rede quântica, incluindo canais e nós.
 - 2: **Saída:** Rota otimizada para a transmissão de qubits.
 - 3: **Inicialização do Agente:**
 - 4: Definir taxa de aprendizado (α), fator de desconto (γ) e probabilidade de seleção de ações aleatórias (ε).
 - 5: Inicializar tabela Q com valores arbitrários.
 - 6: **Definição do Estado:**
 - 7: Capturar a configuração atual da rede, incluindo fidelidade dos canais, quantidade de pares EPR disponíveis e qubits nos nós.
 - 8: **Seleção de Ação:**
 - 9: **while** Condição de parada não atingida **do**
 - 10: Escolher ação baseada na política ε -greedy.
 - 11: Executar a ação e observar o novo estado e recompensa.
 - 12: **Atualização do Valor Q:**
 - 13: Calcular a recompensa com base na fidelidade e eficiência.
 - 14: Atualizar a tabela Q usando a fórmula:
 - 15: $Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha [R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$
 - 16: **Roteamento de Qubit:**
 - 17: Utilizar a rota selecionada para transmitir o qubit.
 - 18: Verificar a disponibilidade de pares EPR e qubits.
 - 19: **Cálculo da Recompensa:**
 - 20: Calcular a recompensa baseada na fidelidade e sucesso do roteamento.
 - 21: **end while**
 - 22: **retorna** Rota otimizada.
-

- **Inicialização do Agente:** o agente é inicializado com parâmetros como taxas de aprendizado (α), fator de desconto (γ) e probabilidade de seleção de ações aleatórias (ε). Ele também recebe informações sobre a topologia da rede, representada por nós e canais.
- **Definição do Estado:** o agente constrói uma representação do estado atual da rede, considerando a disponibilidade de pares EPR e qubits em canais e nós. Essa representação é usada como entrada para o aprendizado.
- **Seleção de Ação:** com base no estado atual, o agente seleciona uma ação de roteamento. Ele usa uma política ε -greedy, o que significa que, com probabilidade (ε), uma ação aleatória é escolhida e, com probabilidade de $1 - (\varepsilon)$, a ação que maximiza o valor Q é escolhida.
- **Atualização do Valor Q:** Após a seleção da ação e execução da rota, o agente recebe uma recompensa com base na qualidade da rota escolhida. Os valores Q do agente são atualizados usando um processo de aprendizado, onde os alvos são

as recompensas esperadas. Os valores Q são atualizados usando a fórmula:

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha \left[R(s, a) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a) \right] \quad (1)$$

Onde:

- $Q(s, a)$ é o valor Q estimado para o par estado-ação.
 - α é a taxa de aprendizado.
 - $R(s, a)$ é a recompensa recebida.
 - γ é o fator de desconto.
 - $\max_{a'} Q(s', a')$ é a estimativa do valor ótimo para o próximo estado.
- **Roteamento de Qubit:** A rota selecionada é usada para rotear eficientemente um qubit na rede. A disponibilidade de pares EPR e qubits em canais e nós é considerada. Dependendo das condições, a criação de novos pares EPR e a alocação de qubits na rota podem ser necessárias.
 - **Cálculo da Recompensa:** A recompensa é calculada com base na fidelidade da transmissão do qubit e no sucesso do roteamento. Quanto maior a fidelidade e o sucesso, maior a recompensa.

5. Estudo de Caso

5.1. Modelagem e Parâmetros da Rede Quântica

Para avaliar a nossa proposta, foi realizada a modelagem da rede quântica utilizando simulação discreta através da representação em grafos. A topologia adotada para o estudo de caso foi a topologia em grade, apresentada na Figura 3. Formalmente, essa rede pode ser representada como $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de nós que representam os nós quânticos. Cada nó quântico é capaz de realizar operações fundamentais de comunicação quântica, como teletransporte e troca de entrelaçamento, sendo capaz de enviar e receber informações quânticas na forma de qubits. De outro modo, E é o conjunto de arestas que representam os canais de comunicação quântica entre esses nós. Cada nó $v \in V$ está associado a atributos, definidos da seguinte forma:

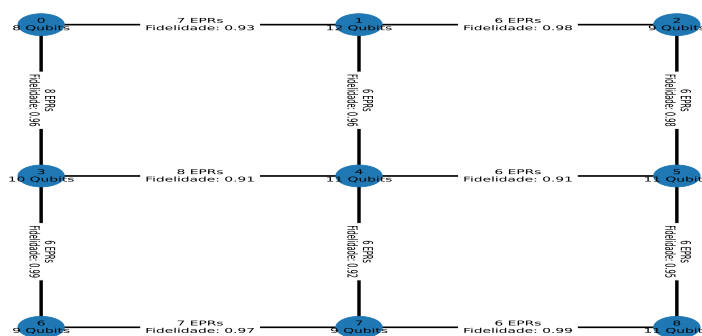


Figura 3. Exemplo de Rede Quântica em Topologia de Grade.

- **Capacidade do Nó:** Indica quantos qubits estão armazenados na memória quântica de um nó em um determinado momento e podem ser utilizados para as tarefas de teletransporte, geração e troca de entrelaçamento.

- **Taxa de Decoerência de Qubit:** Refere-se à velocidade com que os qubits perdem suas propriedades quânticas devido à interação com o ambiente.

Do mesmo modo, os canais de comunicação (arestas) na rede possuem atributos, definidos da seguinte forma:

- **Número de Pares EPR:** Refere-se à quantidade de pares EPR no canal de comunicação, em determinado momento.
- **Fidelidade do Canal:** Indica a qualidade ou fidelidade inicial do canal de comunicação quântica. Um canal com alta fidelidade garante a transmissão precisa de informações quânticas.
- **Taxa de Perda de Fidelidade:** Refere-se à taxa na qual a fidelidade do canal de comunicação quântica diminui devido à decoerência ou outras formas de ruído.
- **Taxa de Purificação do Canal:** Representa a taxa na qual técnicas de purificação são aplicadas ao canal para melhorar ou manter sua fidelidade.

5.2. Cenários de Avaliação

Para o estudo de caso foram definidos dois cenários de avaliação, cada um com quatro conjuntos de configurações. No primeiro cenário, todos os nós e canais da rede possuem as mesmas configurações iniciais. A Tabela 1 apresenta o primeiro cenário, com os quatro conjuntos de configurações.

Tabela 1. Configurações do Cenário 1: nós e canais uniformes.

Parâmetro	Config1	Config2	Config3	Config4
Qubits	$2n$	$1.5n$	n	$n/2$
EPRs	10	7	5	2
Decoerência	0.005%	0.01%	0.03%	0.05%
Purificação	0.1%	0.05%	0.05%	0.05%
Fidelidade	100.00%	0.95%	90.00%	90.00%

Na Tabela 1, os parâmetros das quatro configurações do cenário 1 são apresentados. A Capacidade do Nó (em qubits) varia de acordo com o tamanho da rede (n), enquanto que os outros parâmetros têm valores iniciais definidos na tabela. O mesmo valor de decoerência é utilizado para a perda da fidelidade e a perda da capacidade do nó, tendo a variação medida com relação ao valor atual de cada parâmetro.

No segundo cenário, os nós e canais possuem configurações iniciais variáveis, distribuídas aleatoriamente dentro do intervalo estabelecido em cada uma das configurações. A Tabela 2 apresenta as configurações para o Cenário 2. Assim como no primeiro cenário, a Configuração 1 (config1) pode ser considerada o melhor caso, seguindo das Configurações 2 e 3, com a configuração 4 sendo o pior caso.

Para a esse estudo de caso, o ReqRoute é comparado com quatro outras estratégias de roteamento. A primeira estratégia é o qDijkstra, conforme descrito por Van Meter et al. (2013) [Van Meter et al. 2013], que se baseia na menor distância entre os nós. A segunda, denominada R1: fidelidade, foca na fidelidade das rotas, como apresentado em Li et al. (2021) [Li et al. 2021]. A terceira, R2: eprs, prioriza a quantidade de pares EPR disponíveis, conforme discutido em Chakraborty et al. (2019) [Chakraborty et al. 2019].

Tabela 2. Configurações do Cenário 2: nós e canais variáveis.

Parâmetro	Config1	Config2	Config3	Config4
Qubits	$[1.5n, 2.5n]$	$[1.0n, 1.5n]$	$[0.75n, 1n]$	$[0.3n, 0.5n]$
EPRs	$[8, 10]$	$[5, 7]$	$[3, 4]$	$[2, 3]$
Decoerência	$[0.005\%, 0.009\%]$	$[0.01\%, 0.02\%]$	$[0.025\%, 0.03\%]$	$[0.035\%, 0.05\%]$
Purificação	$[0.1\%, 0.07\%]$	$[0.05\%, 0.07\%]$	$[0.05\%, 0.07\%]$	$[0.05\%, 0.07\%]$
Fidelidade	$[95, 100]\%$	$[90, 95]\%$	$[85, 90]\%$	$[85, 90]\%$

Por fim, a estratégia R3: qubits considera a disponibilidade de qubits, conforme explorado por Patil et al. (2021) [Patil et al. 2021].

No estudo de caso, são realizadas simulações com 100 requisições de roteamento, cada uma com um nó de origem e destino distintos. O protocolo em análise avalia a melhor rota para cada requisição, levando em conta que a distância entre os nós de origem e destino varia. Para todas as simulações, os valores de $(\alpha), (\gamma)$ e (ε) foram ajustados empiricamente respectivamente para 0.2, 0.8, 0.8. Este método proporciona uma avaliação abrangente do desempenho do ReqRoute em comparação com as estratégias de roteamento existentes, em uma variedade de cenários de rede.

6. Resultados

6.1. Resultados para o Cenário 1

Os resultados do estudo de caso para as quatro configurações do Cenário 1 são apresentados na Figura 4. O gráfico apresenta a fidelidade média das rotas em redes de diferentes tamanhos, variando de 4 a 64 nós. Em cada caso, o desempenho do ReqRoute é comparado com outras quatro estratégias de roteamento. Nesse cenário, todos os nós e canais da rede têm valores iniciais uniformes em todos os parâmetros, conforme apresentado na Tabela 1 (Seção 5). As configurações indicam variações possíveis desses parâmetros.

Observa-se que o ReqRoute apresenta desempenho superior às demais estratégias, que exibem resultados mais próximos entre si. O algoritmo qDijkstra registra o menor desempenho, enquanto o R3:qubits mostra-se mais eficaz, sendo superado apenas pelo ReqRoute. Nas configurações testadas, a Configuração 1 apresenta resultado superior de fidelidade, seguida pelas Configurações 2, 3 e 4, com esta última apresentando a menor fidelidade. Os resultados indicam uma tendência geral: a fidelidade média das rotas tende a ser menor em redes menores e aumenta com o crescimento do tamanho da rede, estabilizando-se em redes com mais de 30 nós. Esse padrão pode ser atribuído à maior capacidade de redundância em redes maiores, onde múltiplas rotas alternativas ajudam a manter a fidelidade mesmo em caso de falhas pontuais. Além disso, em redes amplas, os algoritmos de roteamento, como o ReqRoute, têm mais dados para aprender e otimizar as rotas, melhorando progressivamente a fidelidade. Por outro lado, redes menores podem enfrentar desafios únicos, como a limitação de rotas alternativas e recursos, tornando-as mais vulneráveis a falhas e reduzindo a fidelidade das rotas.

6.2. Resultados para o Cenário 2

A Figura 5 apresenta os resultados do estudo de caso para as quatro configurações do cenário 2. Nesse cenário cada nó da rede tem valores iniciais diferentes capacidade de nó e

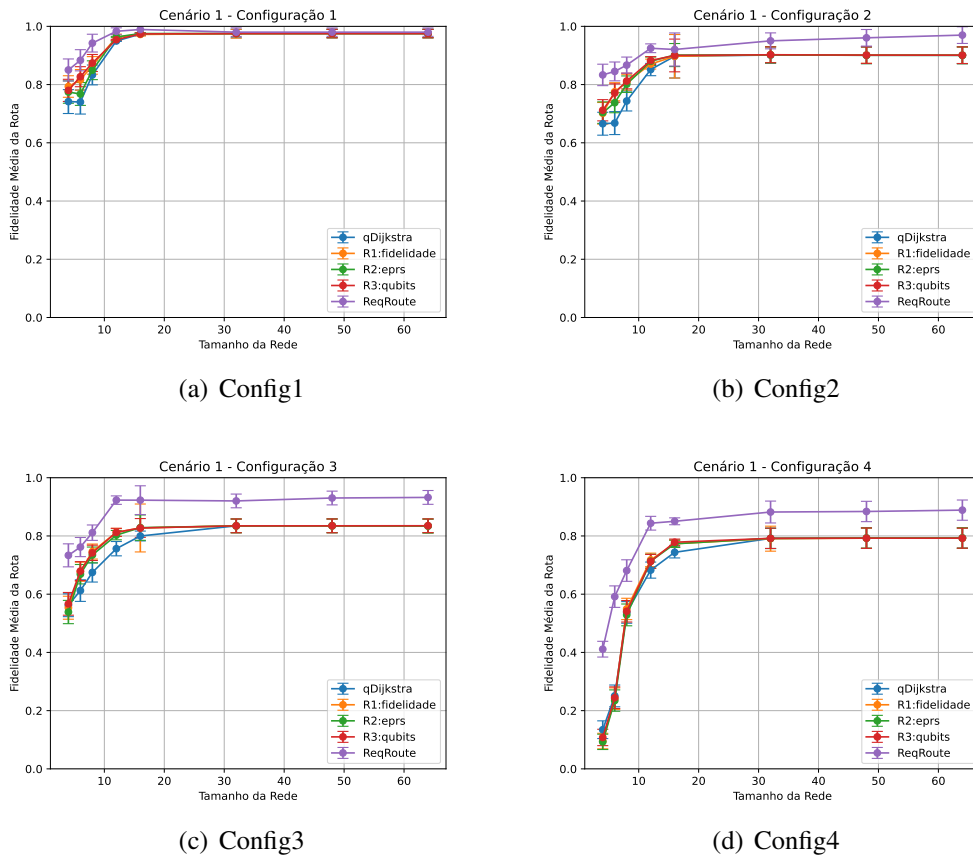
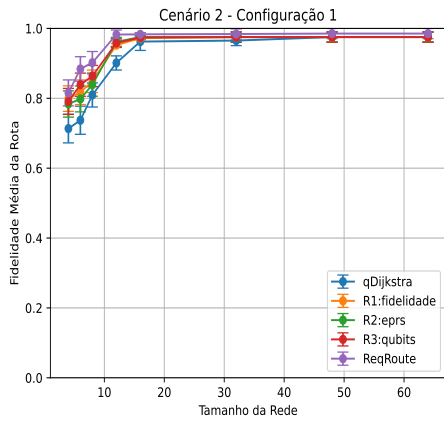


Figura 4. Resultado da Fidelidade Média da Rota em cada configuração, no Cenário 1.

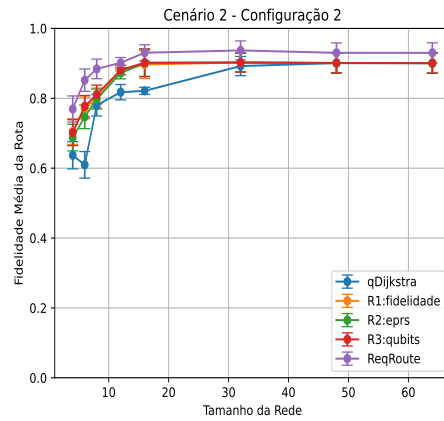
taxa de decoerência, e cada canal da rede tem valores diferentes de fidelidade, quantidade de pares EPR e purificação, conforme apresentado na Tabela 2 (Seção 5).

De modo similar ao Cenário 1, no Cenário 2 o ReqRoute manteve um desempenho superior em relação às demais estratégias, confirmando as expectativas. Assim como observado anteriormente, a Configuração 1 apresentou os resultados mais elevados, superando as demais configurações. Por outro lado, a Configuração 4 registrou os menores valores de desempenho, mantendo uma consistência com as tendências identificadas no Cenário 1.

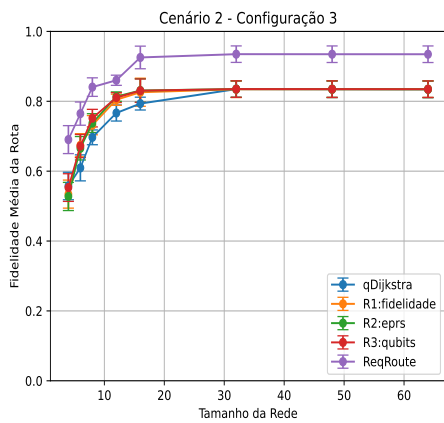
No entanto, é observado que os resultados do ReqRoute neste cenário mostram-se mais próximos aos das outras propostas. Uma possível explicação para essa convergência de desempenho pode estar relacionada à variabilidade inicial dos nós da rede. Como o ReqRoute é baseado em aprendizado por reforço, a diversidade nas condições iniciais dos nós pode exigir um período mais extenso para que o algoritmo aprenda e se adapte eficientemente, identificando a rota ótima. Além disso, essa proximidade nos resultados pode indicar um limite máximo de desempenho de fidelidade inerente à própria configuração da rede no Cenário 2. A complexidade adicional introduzida pela variabilidade nas capacidades dos nós e nas características dos canais pode impor um teto de desempenho que é intrinsecamente mais baixo do que o observado no Cenário 1.



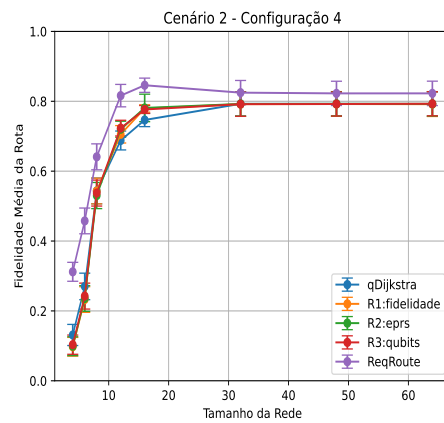
(a) Config1



(b) Config2



(c) Config3



(d) Config4

Figura 5. Resultado da Fidelidade Média da Rota em cada configuração, no Cenário 2.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

As redes de entrelaçamento quântico ainda enfrentam diversos desafios em sua implementação prática, principalmente com relação ao roteamento em redes complexas. Este trabalho apresentou o ReqRoute, um protocolo de roteamento por reforço para redes de entrelaçamento quântico, abordando desafios críticos na construção da Internet Quântica. Este protocolo foi projetado para otimizar as decisões de roteamento, aproveitando uma abordagem de aprendizado por reforço, e demonstrou ser uma solução eficaz, superando consistentemente os métodos tradicionais de roteamento. Através de testes utilizando simulação discreta em dois cenários distintos, um com rede uniforme e outro com composição variável, o ReqRoute provou sua versatilidade e eficiência, adaptando-se e aprendendo eficazmente em ambientes de rede diversificados, mantendo rotas de alta fidelidade em diferentes configurações de rede.

Para trabalhos futuros, propõe-se a expansão do ReqRoute para lidar com desafios adicionais em redes quânticas mais complexas e dinâmicas. Uma área de interesse é a integração de mecanismos de aprendizado que possam se adaptar rapidamente a mudan-

ças na topologia da rede e condições variáveis de qubits e canais. Além disso, explorar a aplicação do ReqRoute em cenários de rede em larga escala e sua interação com protocolos clássicos de comunicação pode fornecer informações para a implementação prática da Internet Quântica. Outra direção promissora envolve a investigação de estratégias para minimizar o consumo de recursos, como a largura de banda e a energia, enquanto se mantém a fidelidade das rotas, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência das futuras redes quânticas.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto 2020/04031-1, projeto 2021/00199-8 (CPE SMARTNESS), projeto 2023/00673-7 e projeto 2023/00811-0.

Referências

- Abelém, A., Vardoyan, G., and Towsley, D. (2020). Quantum internet: The future of internetworking. In *Minicursos do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 48–90. SBC.
- Abreu, D., Abelém, A., and Rothenberg, C. R. E. (2022). Desafios e oportunidades de pesquisa para o roteamento em redes quânticas. In *Anais do II Workshop de Comunicação e Computação Quântica*, pages 37–42. SBC.
- Broadbent, A., Fitzsimons, J., and Kashefi, E. (2009). Universal blind quantum computation. In *2009 50th annual IEEE symposium on foundations of computer science*.
- Caleffi, M., Amoretti, M., Ferrari, D., Cuomo, D., Illiano, J., Manzalini, A., and Cacciapuoti, A. S. (2022). Distributed quantum computing: a survey. *arXiv preprint arXiv:2212.10609*.
- Chakraborty, K., Rozpedek, F., Dahlberg, A., and Wehner, S. (2019). Distributed routing in a quantum internet. *arXiv preprint arXiv:1907.11630*.
- Cuomo, D., Caleffi, M., and Cacciapuoti, A. S. (2020). Towards a distributed quantum computing ecosystem. *IET Quantum Communication*, 1(1):3–8.
- Degen, C. L., Reinhard, F., and Cappellaro, P. (2017). Quantum sensing. *Reviews of modern physics*, 89(3):035002.
- Fischer, A. and Towsley, D. (2021). Distributing graph states across quantum networks. In *2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*.
- Geddada, V. J. and Lakshmi, P. (2022). Distance based security using quantum entanglement: a survey. In *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–4. IEEE.
- Gyongyosi, L. and Imre, S. (2018). Decentralized base-graph routing for the quantum internet. *Physical Review A*, 98(2):022310.
- Gyongyosi, L. and Imre, S. (2020). Routing space exploration for scalable routing in the quantum internet. *Scientific reports*, 10(1):11874.

- Gyongyosi, L., Imre, S., and Nguyen, H. V. (2018). A survey on quantum channel capacities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2):1149–1205.
- Hasan, S. R., Chowdhury, M. Z., Saiam, M., and Jang, Y. M. (2023). Quantum communication systems: vision, protocols, applications, and challenges. *IEEE Access*.
- Illiano, J., Caleffi, M., Manzalini, A., and Cacciapuoti, A. S. (2022). Quantum internet protocol stack: A comprehensive survey. *Computer Networks*, 213:109092.
- Kozłowski, W., Wehner, S., Van Meter, R., Rijsman, B., Cacciapuoti, A., Caleffi, M., and Nagayama, S. (2023). Rfc 9340 architectural principles for a quantum internet. *Architecture*, 4:4.
- Kumar, A., Krishnamurthi, R., Sharma, G., Jain, S., Srikanth, P., Sharma, K., and Aneja, N. (2023). Revolutionizing modern networks: Advances in ai, machine learning, and blockchain for quantum satellites and uav-based communication. *arXiv preprint arXiv:2303.11753*.
- Kumar, A., Zhou, A., Tucker, G., and Levine, S. (2020). Conservative q-learning for offline reinforcement learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Le, L. and Nguyen, T. N. (2022). Dqra: Deep quantum routing agent for entanglement routing in quantum networks. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 3:1–12.
- Li, C., Li, T., Liu, Y.-X., and Cappellaro, P. (2021). Effective routing design for remote entanglement generation on quantum networks. *npj Quantum Information*, 7(10).
- Miguel-Ramiro, J., Pirker, A., and Dür, W. (2023). Optimized quantum networks. *Quantum*, 7:919.
- Nain, P., Vardoyan, G., Guha, S., and Towsley, D. (2020). On the analysis of a multipartite entanglement distribution switch. *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*, 4(2):1–39.
- Nötzel, J. and DiAdamo, S. (2020). Entanglement-enhanced communication networks. In *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*.
- Pant, M., Krovi, H., Towsley, D., Tassiulas, L., Jiang, L., Basu, P., Englund, D., and Guha, S. (2019). Routing entanglement in the quantum internet. *npj Quantum Information*.
- Patil, A., Jacobson, J. I., Van Milligen, E., Towsley, D., and Guha, S. (2021). Distance-independent entanglement generation in a quantum network using space-time multiplexed greenberger–horne–zeilinger (ghz) measurements. In *2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 334–345. IEEE.
- Patil, A., Pant, M., Englund, D., Towsley, D., and Guha, S. (2022). Entanglement generation in a quantum network at distance-independent rate. *npj Quantum Information*.
- Pirker, A. and Dür, W. (2019). A quantum network stack and protocols for reliable entanglement-based networks. *New Journal of Physics*, 21(3):033003.
- Qiang, W. and Zhongli, Z. (2011). Reinforcement learning model, algorithms and its application. In *2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, pages 1143–1146. IEEE.
- Van Meter, R., Satoh, T., Ladd, T. D., Munro, W. J., and Nemoto, K. (2013). Path selection for quantum repeater networks. *Networking Science*, 3(1):82–95.