



QuantumNet: Um Simulador de Redes Quânticas baseado em uma Arquitetura em Camadas com Interface Gráfica

Arthur Pimentel¹, David Tavares¹, Diego Abreu^{1,2}, Antônio Abelém¹

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA)

² Rede Nacional de Ensino e Pesquisa

arthur.pimentel@icen.ufpa.br, david.tavares@icen.ufpa.br

diego.abreu@rnp.br, abelem@ufpa.br

Abstract. *Quantum networks are fundamental to the future Quantum Internet, but their practical implementation still faces physical and operational constraints that hinder the evaluation of protocols in real environments. In this context, simulators become essential tools for investigating architectures, communication mechanisms, and applications in a controlled and reproducible manner. This work presents QuantumNet, an open-source quantum network simulator based on discrete-event simulation. The tool adopts an explicit layered architecture inspired by classical network models and aligned with emerging architectural principles and RFCs of the Quantum Internet, enabling a structured and standards-oriented representation of communication processes. This alignment constitutes a key differentiator, fostering interoperability, reproducibility, and adherence to ongoing standardization efforts. In addition, QuantumNet provides a graphical user interface that facilitates the configuration of parameters, construction of network topologies, and visualization of simulation artifacts, improving usability and accessibility for both research and educational purposes.*

Resumo. *As redes quânticas são fundamentais para a futura Internet Quântica, porém sua implementação prática ainda enfrenta restrições físicas e operacionais que dificultam a avaliação de protocolos em ambientes reais. Nesse contexto, simuladores tornam-se ferramentas essenciais para investigar arquiteturas, mecanismos de comunicação e aplicações de forma controlada e reproduzível. Este trabalho apresenta o QuantumNet, um simulador de redes quânticas de código aberto baseado em simulação de eventos discretos. A ferramenta adota uma arquitetura em camadas explícita, inspirada em modelos clássicos de redes e alinhada aos princípios arquiteturais e às RFCs emergentes da Internet Quântica, permitindo uma representação estruturada e orientada a padrões dos processos de comunicação. Esse alinhamento constitui um diferencial importante, ao promover interoperabilidade, reprodutibilidade e aderência aos esforços de padronização em andamento. Além disso, o QuantumNet oferece uma interface gráfica que facilita a configuração de parâmetros, a construção de topologias de rede e a visualização dos artefatos da simulação, tornando a ferramenta mais acessível tanto para pesquisa quanto para fins educacionais.*

1. Introdução

O avanço da computação e da comunicação quântica introduz capacidades promissoras, como sensoriamento de alta precisão, distribuição segura de chaves e computação dis-

tribuída, ampliando o alcance dos modelos clássicos de processamento e transmissão de informação. Nesse contexto, as redes quânticas emergem como base para a interconexão de dispositivos quânticos remotos e como passo fundamental em direção à futura Internet Quântica [Abelém et al. 2020]. Sua construção, contudo, envolve uma arquitetura complexa, composta por diferentes elementos físicos e níveis funcionais, incluindo enlaces para transmissão de qubits, repetidores para distribuição de emaranhamento e nós finais capazes de processar e armazenar informação quântica [Zhang et al. 2024].

Para organizar esses elementos, uma abordagem recorrente consiste em estruturá-los em pilhas funcionais que articulam recursos quânticos e mecanismos clássicos de controle. Contudo, a consolidação dessas arquiteturas enfrenta restrições fundamentais e específicas da comunicação quântica que dificultam a comunicação em longas distâncias e impõem desafios adicionais ao desenvolvimento de protocolos, mecanismos de roteamento e estratégias de gerenciamento de recursos adequados ao contexto quântico [Abreu et al. 2022].

Nesse cenário, simuladores de redes quânticas desempenham papel central no avanço da área, pois permitem investigar arquiteturas, protocolos e algoritmos em ambientes controlados, sem depender da disponibilidade limitada de hardware quântico real. Tais ferramentas viabilizam a análise de comportamento, desempenho e integração entre componentes da rede, apoiando tanto a formulação quanto a validação de novas propostas. Entretanto, embora diversos simuladores tenham sido propostos na literatura, muitas dessas ferramentas concentram-se em aspectos específicos, como modelagem detalhada de hardware, protocolos particulares ou aplicações isoladas [Abreu et al. 2024]. Esse panorama dificulta a experimentação integrada de mecanismos distribuídos em diferentes níveis da pilha de comunicação, especialmente quando o objetivo é investigar de forma combinada o comportamento das camadas da rede e suas interações.

Neste contexto, este trabalho apresenta o **QuantumNet**, um simulador de redes quânticas de código aberto, desenvolvido em Python com interface gráfica e orientado à experimentação de protocolos e algoritmos de comunicação. A ferramenta adota uma arquitetura em cinco camadas: física, enlace, rede, transporte e aplicação, alinhada a RFCs (*Request for Comments*) da Internet Quântica [Kozłowski et al. 2023, Wang et al. 2024] e documentos arquiteturais da QIRG (*Quantum Internet Research Group*) IETF [Lopez et al. 2026, Meter et al. 2026], com o objetivo de estruturar explicitamente as responsabilidades funcionais da comunicação quântica seguindo uma modelagem mais aderente às abstrações propostas para redes quânticas [Kozłowski et al. 2023]. Com essa abordagem, busca-se oferecer um ambiente flexível para o desenvolvimento, adaptação e avaliação de mecanismos como roteamento, purificação de emaranhamento e aplicações distribuídas, favorecendo a investigação da pilha de protocolos como objeto central de estudo.

2. Trabalhos Relacionados

Diversas ferramentas têm sido propostas para apoiar a investigação de protocolos, mecanismos de controle e aplicações em redes quânticas, diferindo quanto ao modelo de execução, nível de abstração e organização arquitetural. Um estudo comparativo recente sistematiza esse panorama a partir de critérios como foco arquitetural, componentes modelados, protocolos suportados e aplicações visadas [Abreu et al. 2024]. A partir

disso, este trabalho considera simuladores representativos e amplamente recorrentes na literatura para situar a proposta do QuantumNet.

Nesse contexto, este trabalho adota como base de comparação os seguintes simuladores multipropósito recorrentes na literatura e representativos de abordagens distintas de simulação, a saber: **NetSquid** [Coopmans et al. 2021], **SeQUeNCe** [Wu et al. 2021], **QuISP** [Sato et al. 2022] e **QuNetSim** [Diadamo et al. 2021]. Em geral, essas ferramentas priorizam a modelagem física detalhada, a implementação de protocolos em frameworks modulares ou arquiteturas orientadas a componentes. Embora sejam relevantes para diferentes objetivos experimentais, não colocam a pilha de comunicação como eixo central de organização da simulação, o que dificulta, em graus distintos, a análise sistemática da separação de responsabilidades entre camadas e da interação entre mecanismos de comunicação em diferentes níveis da rede. Além disso, aspectos como acesso restrito, dependências estruturais específicas ou menor foco em extensões orientadas à pilha podem limitar sua adequação em cenários que exigem experimentação aberta, reproduzível e facilmente extensível.

Tabela 1. Comparativo entre simuladores de redes quânticas.

Simulador	ME	OA	Foco Principal	CA
NetSquid	ED	Modular	Modelagem física	Não
SeQUeNCe	ED	Modular	Protocolos	Sim
QuISP	ED	Componentes	Protocolos e escalabilidade	Sim
QuNetSim	TR	Modular	Protocolos de rede	Sim
QuantumNet	ED	Camadas	Pilha de protocolos	Sim

ME: Modelo de Execução (ED: Eventos Discretos; TR: Tempo Real).

OA: Organização Arquitetural.

CA: Código Aberto.

A Tabela 1 sintetiza esse posicionamento ao contrastar modelo de execução, organização arquitetural, foco principal e disponibilidade de código. Nesse contexto, o simulador proposto distingue-se por ser um simulador de código aberto orientado a eventos discretos, concebido com ênfase explícita na organização em camadas. Sua arquitetura estrutura a simulação nos níveis físico, de enlace, de rede, de transporte e de aplicação, favorecendo isolamento funcional, extensibilidade e avaliação de protocolos com responsabilidades bem definidas. Essa escolha o torna particularmente adequado para estudos centrados na pilha de protocolos, na interação entre camadas e na dinâmica de comunicação em redes quânticas.

3. QuantumNet

O avanço das redes quânticas demanda arquiteturas de simulação capazes de organizar, de forma explícita, responsabilidades associadas à criação de recursos quânticos, à distribuição de emaranhamento e ao suporte à comunicação entre nós distribuídos. Nesse contexto, o QuantumNet adota uma organização funcional em camadas, pois o isolamento entre operações físicas, mecanismos de enlace e serviços de mais alto nível é uma estratégia já discutida na literatura para redes quânticas [Coopmans et al. 2021]. Essa decisão de projeto também é coerente com documentos arquiteturais recentes da QIRG, que

destacam a necessidade de abstrações adequadas para organizar, utilizar e gerenciar redes quânticas [Kozłowski et al. 2023]. Além disso, como aplicações e nós finais demandam serviços distintos sobre essa infraestrutura, a separação em camadas favorece uma modelagem mais clara da pilha e de seus pontos de uso por protocolos de nível superior, em consonância com a sistematização de cenários de aplicação e requisitos apresentada na RFC 9583 [Wang et al. 2024].

O QuantumNet foi concebido com foco em extensibilidade, reprodutibilidade e clareza estrutural, permitindo a incorporação de novos protocolos, parâmetros e cenários experimentais sem comprometer a organização interna do ambiente. Além disso, o simulador é disponibilizado como software de código aberto em repositório público¹, favorecendo inspeção, reutilização, replicação de experimentos e evolução colaborativa por outros pesquisadores. Além de oferecer uma interface gráfica amigável para facilitar o seu uso. Detalhes adicionais sobre o uso do simulador estão disponíveis no Anexo A.

Essa organização adota o isolamento explícito de responsabilidades, em que cada camada inferior fornece serviços analíticos e operacionais para a camada imediatamente superior. Com isso, a comunicação quântica ponta a ponta pode ser abstraída progressivamente, permitindo que pesquisadores concentrem seus esforços no desenvolvimento e avaliação de protocolos de mais alto nível, enquanto os aspectos físicos, temporais e estruturais da rede permanecem encapsulados nos componentes apropriados do simulador.

3.1. Arquitetura

A arquitetura do simulador está organizada em dois eixos complementares: a pilha de protocolos, responsável pela abstração funcional da comunicação quântica, e os módulos estruturais de simulação, responsáveis por parametrizar, sustentar e coordenar a execução do ambiente. A Figura 1 apresenta essa visão integrada, evidenciando simultaneamente a pilha de camadas e os módulos que a apoiam.

Camada Física: essa camada tem funcionamento similar aos simuladores apresentados na seção 2 e implementa os recursos elementares da simulação, incluindo criação e gerenciamento de qubits em memórias quânticas, estabelecimento inicial de pares EPR (*Einstein-Podolsky-Rosen*), isto é, pares de qubits emaranhados compartilhados entre nós adjacentes, e atualização de atributos associados aos recursos quânticos. Além disso, também são tratados parâmetros como fidelidade, tipos de erro, decoerência temporal e custo operacional das ações básicas, definindo a qualidade dos recursos posteriormente consumidos pelas camadas superiores.

Camada de Enlace: opera sobre os pares EPR gerados na camada física para produzir enlaces locais mais confiáveis. Essa camada foi implementada seguindo o modelo proposto por [Dahlberg et al. 2019]. É responsável também por mecanismos de purificação, processo em que múltiplos pares imperfeitos são consumidos para obter um novo par com maior fidelidade.

Camada de Rede: a camada foi implementada seguindo a arquitetura proposta em [Pant et al. 2019], e coordena a formação de conectividade quântica entre nós não adjacentes. Para isso, combina seleção de caminhos com operações de *entanglement swapping*, encadeando pares EPR distribuídos em saltos consecutivos até formar enlaces

¹Repositório público do projeto: <<https://github.com/quantumgercom/QuantumNet>>.

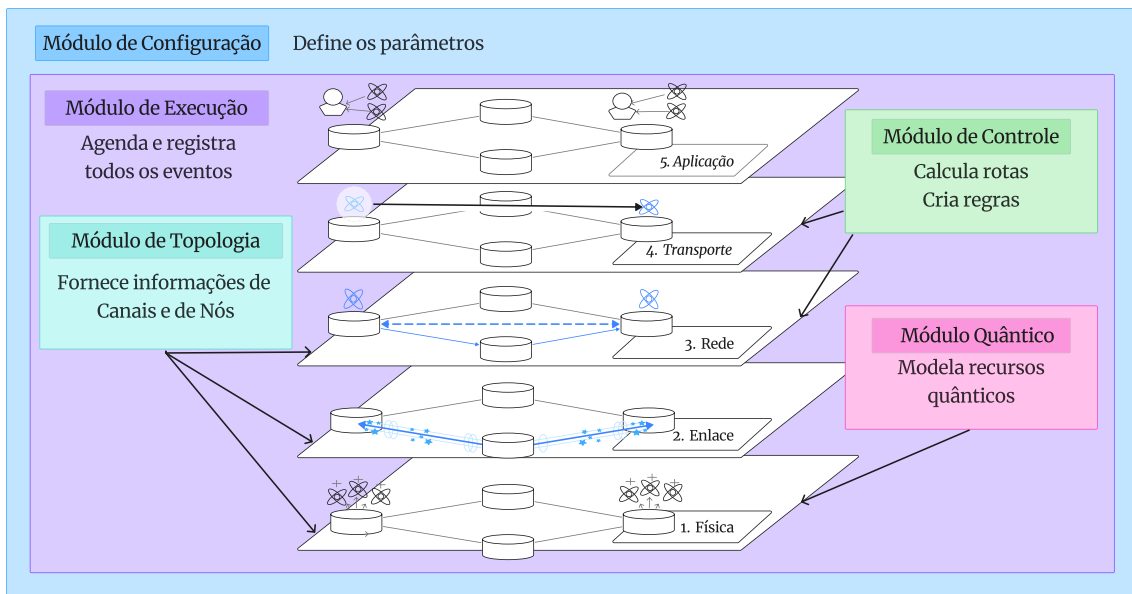


Figura 1. Arquitetura do simulador QuantumNet, integrando pilha de camadas e módulos estruturais

lógicos de longa distância. Essa camada concentra, portanto, a construção de rotas e a expansão do emaranhamento para além da vizinhança imediata.

Camada de Transporte: utiliza os enlaces lógicos produzidos pela camada de rede para viabilizar a comunicação fim a fim. Nessa camada, o simulador implementa o teletransporte quântico, consumindo emaranhamento previamente distribuído e comunicação clássica auxiliar para transferir estados entre nós remotos, em consonância com a visão de que a rede quântica provê recursos de emaranhamento para a transmissão de informação quântica entre aplicações [Kozłowski et al. 2023].

Camada de Aplicação: reúne os protocolos e experimentos em nível de usuário executados sobre a infraestrutura provida pelas camadas inferiores. Nesse nível, aplicações e cenários de uso da Internet Quântica, como comunicação segura, computação quântica cega e computação quântica distribuída, podem requisitar serviços da pilha sem manipular diretamente os mecanismos físicos e operacionais encapsulados nas demais camadas [Wang et al. 2024].

Além da pilha de protocolos, a arquitetura depende de módulos que sustentam a modelagem, a execução e a parametrização da simulação. Na Figura 1, esses módulos aparecem como componentes transversais de suporte ao funcionamento do sistema.

Módulo de Configuração: centraliza os parâmetros que definem cada instância de simulação, incluindo tipos de nós, modelos e probabilidades de erro, quantidade de recursos, custos operacionais e demais restrições experimentais. Esse módulo estabelece as condições do cenário e permite adaptar o simulador a diferentes hipóteses de estudo.

Módulo de Execução: implementa a dinâmica temporal do ambiente por meio de simulação orientada a eventos discretos. Suas funções incluem agendamento, ordenação e disparo de eventos, garantindo consistência cronológica na evolução do estado da rede.

Módulo de Topologia: fornece a estrutura de grafo sobre a qual operam as cama-

das física, de enlace e de rede. Nesse módulo, vértices representam nós e arestas representam canais de comunicação, permitindo configurar a conectividade, manter atributos da rede e apoiar sua visualização durante os experimentos.

Módulo de Controle: concentra as decisões associadas ao encaminhamento e à coordenação da comunicação, incluindo cálculo de rotas e definição de regras de operação. Sua atuação dá suporte principalmente às camadas de rede e de transporte, organizando o plano decisório empregado durante a simulação.

Módulo Quântico: mantém a representação computacional dos recursos quânticos elementares, como qubits e pares EPR, servindo de base à camada física. Esse módulo sustenta atributos como estados e fidelidades, dos quais dependem diretamente as operações executadas ao longo de toda a pilha.

Em conjunto, a pilha de protocolos e os módulos estruturais permitem que o simulador represente, de forma organizada e extensível, tanto os aspectos operacionais da comunicação quântica quanto os mecanismos de parametrização e controle necessários à condução de experimentos. Essa separação favorece a evolução independente de componentes do simulador, amplia sua reutilização em diferentes cenários e reforça seu papel como ferramenta de apoio à pesquisa em redes quânticas.

4. Casos de Uso

Os casos de uso apresentados nesta seção evidenciam a relevância do QuantumNet como ferramenta de apoio à pesquisa em redes quânticas. O simulador proposto já foi empregado em cenários de pesquisa distintos, incluindo estudos previamente publicados. A partir desses antecedentes, esta submissão retoma tais aplicações em formato sintético e as articula com demonstrações baseadas na implementação atualmente disponibilizada no repositório, permitindo observar as capacidades do simulador já exploradas na literatura e sua utilidade para novos experimentos. Detalhes adicionais sobre cada caso de teste estão disponíveis no Anexo B.

4.1. Simulação de ataques a repetidores quânticos

Este estudo de caso consiste na modelagem de comportamentos maliciosos em repetidores quânticos, com foco nos ataques do tipo *Black Hole Repeater*. Nesse cenário, o objetivo é analisar como a manipulação do processo de *entanglement swapping* por nós comprometidos pode degradar o desempenho da rede sem necessariamente alterar métricas tradicionalmente observadas no monitoramento. No trabalho [Smith et al. 2025], esse problema foi investigado por meio da modelagem de repetidores maliciosos capazes de introduzir erros deliberados nas operações de *swapping* ou falsificar métricas operacionais, comprometendo a taxa de sucesso das requisições e a eficiência global da rede [Smith et al. 2025].

No repositório do QuantumNet, esse caso de uso é representado por uma implementação sintetizada do cenário de ataque, incorporada à dinâmica da camada de rede. A demonstração atualmente disponibilizada considera uma topologia linear composta por dois nós finais e dois repetidores intermediários, na qual um dos repetidores pode ser marcado como malicioso. A partir dessa configuração, o simulador permite injetar uma penalização controlada na probabilidade de sucesso do *entanglement swapping*, tornando

observável a degradação progressiva da taxa de sucesso fim a fim à medida que a intensidade do ataque aumenta.

A partir disso, observa-se que o QuantumNet pode ser empregado para avaliar cenários adversariais que afetam diretamente os mecanismos de comunicação quântica, não se restringindo às condições normais da rede. No artigo original, os experimentos avaliaram o impacto desses ataques em diferentes topologias e cenários, considerando métricas como taxa de sucesso das requisições, consumo de pares EPR e fidelidade média das rotas. Os resultados mostraram que os ataques podem reduzir significativamente a taxa de sucesso, enquanto produzem pouca variação em métricas como fidelidade e quantidade de EPR, o que dificulta sua detecção por técnicas tradicionais de monitoramento [Smith et al. 2025].

4.2. Agendamento de purificação na camada de enlace

Esse cenário consiste na experimentação de estratégias de purificação de entrelaçamento na camada de enlace e é particularmente relevante em redes quânticas heterogêneas. Nessas redes a camada de enlace precisa decidir como combinar pares EPR degradados para produzir enlaces com fidelidade suficiente para as camadas superiores.

Em [Tavares et al. 2025], esse problema foi investigado por meio de uma estratégia híbrida de agendamento de purificação, voltada a três desafios principais: a estimação do número adequado de rodadas de purificação sem conhecimento prévio do tipo de ruído do canal, a baixa probabilidade agregada de sucesso das operações e o desperdício de recursos associado a pares EPR ociosos.

No repositório do simulador, esse caso de uso é representado por uma implementação representativa sintetizada desse cenário, incorporada à sua camada de enlace. A demonstração disponibilizada no repositório permite configurar o tipo de ruído do canal, a quantidade inicial de pares EPR, os parâmetros de decoerência e a estratégia de purificação empregada. Em particular, o experimento evidencia o comportamento do motor probabilístico de purificação sob canais *bit-flip* e Werner, contrastando um cenário favorável, em que a purificação evolui com sucesso, com um cenário adverso em que uma abordagem estática falha por insuficiência de recursos. Nesse mesmo cenário adverso, a demonstração também mostra o uso de um mecanismo de reserva de pares EPR, que permite recuperar o processo após falhas e concluir a purificação com sucesso.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o QuantumNet, um simulador de redes quânticas de código aberto, orientado a eventos discretos e estruturado sob uma arquitetura modular em camadas. Os estudos já conduzidos com o simulador, apresentados como casos de uso, indicam a viabilidade da abordagem proposta. O uso do QuantumNet em publicações que exploram cenários e mecanismos distintos reforça seu valor como ferramenta de pesquisa e evidencia sua capacidade de representar, de forma consistente, fenômenos específicos de redes quânticas. Em conjunto, esses resultados mostram que sua organização em camadas favorece a separação de responsabilidades e amplia a extensibilidade da ferramenta.

Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar o suporte a novos cenários de aplicação, especialmente em contextos como computação quântica distribuída e computação quântica cega, além de integrar a ferramenta a outros softwares do ecossistema quântico.

Além disso, planeja-se evoluir interface gráfica para uma estrutura de arrastar e soltar *drag-and-drop*, facilitando o uso educacional do simulador.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio dos auxílios nº 403539/2020-0 e nº 400111/2023-3; e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob os auxílios 2023/00811-0, 2023/00673-7, 2021/00199-8 (CPE SMART-NESS), 2020/04031-1 e 2018/23097-3. Também contou com o apoio da Propesp/UFGA, e da Venturus e da Fundação Guamá, por meio da proposta técnica 002/2025 – CITIA-MAZON.

Referências

- Abelém, A. J. G., Vardoyan, G., and Towsley, D. (2020). Quantum internet: The future of internetworking. In Gomes, D. G., Moraes, I. M., and Campista, M. E. M., editors, *Minicursos do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 48–90. Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre.
- Abreu, D., Abelém, A., and Rothenberg, C. (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, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Abreu, D., Pimentel, A., Moraes, P., Tavares, D., Veloso, A., and Abelém, A. (2024). Multipurpose quantum network simulators: A comparative study. In *Anais do I Workshop de Redes Quânticas*, pages 25–30, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Coopmans, T., Knegjens, R., Dahlberg, A., Maier, D., Nijsten, L., de Oliveira Filho, J., Papendrecht, M., Rabbie, J., Rozpędek, F., Skrzypczyk, M., Wubben, L., de Jong, W., Podareanu, D., Torres-Knoop, A., Elkouss, D., and Wehner, S. (2021). Netsquid, a network simulator for quantum information using discrete events. *Communications Physics*, 4(1):164.
- Dahlberg, A., Skrzypczyk, M., Coopmans, T., Wubben, L., Rozpędek, F., Pompili, M., Stolk, A., Pawełczak, P., Knegjens, R., de Oliveira Filho, J., Hanson, R., and Wehner, S. (2019). A link layer protocol for quantum networks. In *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication, SIGCOMM '19*, page 159–173, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Diadamo, S., Nötzel, J., Zanger, B., and Beşe, M. M. (2021). Qunetsim: A software framework for quantum networks. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2:1–12.
- Kozłowski, W., Wehner, S., Meter, R. V., Rijnsman, B., Cacciapuoti, A. S., Caleffi, M., and Nagayama, S. (2023). Architectural Principles for a Quantum Internet. RFC 9340.
- Lopez, D., Martin, V., Lopez, B., and Contreras, L. M. (2026). A Multiplane Architecture Proposal for the Quantum Internet. Internet-Draft draft-irtf-qirg-qi-multiplane-arch-01, Internet Engineering Task Force. Work in Progress.
- Meter, R. V., Benchasattabuse, N., and Taherkhani, A. (2026). A Quantum Network Architecture. Internet-Draft draft-van-meter-qirg-quantum-network-architecture-00, Internet Engineering Task Force. Work in Progress.

- 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*, 5(1):25.
- Satoh, R., Hajdušek, M., Benchasattabuse, N., Nagayama, S., Teramoto, K., Matsuo, T., Metwalli, S. A., Pathumsoot, P., Satoh, T., Suzuki, S., and Meter, R. V. (2022). Quisp: a quantum internet simulation package. In *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 353–364.
- Smith, A., Abreu, D., Pimentel, A., and Abelém, A. (2025). Redes quânticas sob ataque: Black hole repeaters. In *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 266–279, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Tavares, D., Abreu, D., Moraes, P., Pimentel, A., and Abelém, A. (2025). Estratégia de agendamento de purificação híbrida para redes quânticas de canais ruidosos heterogêneos. In *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 280–293, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Wang, C., Rahman, A., Li, R., Aelmans, M., and Chakraborty, K. (2024). Application Scenarios for the Quantum Internet. RFC 9583.
- Wu, X., Kolar, A., Chung, J., Jin, D., Zhong, T., Kettimuthu, R., and Suchara, M. (2021). Sequence: a customizable discrete-event simulator of quantum networks. *Quantum Science and Technology*, 6(4):045027.
- Zhang, Z., Papagianni, C., Speelman, F., and Grosso, P. (2024). Toward complete quantum network stacks: A survey. *IEEE Network*, 38(5):153–159.

A. Organização do Repositório e Reprodutibilidade

A organização do repositório do *QuantumNet* separa documentação, exemplos de uso, código-fonte e arquivos de configuração do ambiente:

- O diretório `/docs` reúne a documentação com arquivos descritivos sobre componentes centrais do simulador, como relógio de execução, controle, camadas, topologia e *logging*, funcionando como apoio para compreensão do projeto.
- O diretório `/examples` concentra exemplos práticos e *notebooks* voltados à demonstração de cenários e funcionalidades específicas, além dos casos de uso.
- O código principal do simulador encontra-se no diretório `/quantumnet`, que concentra a implementação do núcleo da ferramenta.
- Na raiz do repositório, estão os arquivos voltados à configuração e à reprodutibilidade do ambiente, além do arquivo `README.md`, que centraliza as instruções de instalação e execução.

O `README` reúne os requisitos de instalação, os procedimentos de configuração do ambiente, os comandos de execução e um teste rápido de validação do simulador. Por esse motivo, optou-se por não reproduzir neste apêndice um guia operacional detalhado, concentrando-se aqui apenas na descrição geral da estratégia de reprodutibilidade adotada. O *QuantumNet* pode ser executado localmente com *Python 3.10*, a partir das dependências listadas em `requirements.txt`, ou em ambiente isolado com *Docker*. Além disso, o repositório distingue dois cenários: (i) um ambiente mínimo, que permite

a execução do simulador com suas dependências essenciais, e (ii) um ambiente ampliado, destinado à reprodução de *notebooks* e experimentos interativos com dependências adicionais.

Os experimentos reportados neste trabalho foram executados em um computador com sistema operacional *Ubuntu* (versão 24.04), em arquitetura *x64*, utilizando *Python 3.10*. Essas informações complementam a descrição do ambiente de software e contextualizam as condições de execução adotadas na avaliação do simulador.

B. Demonstração dos Casos de Uso

Nesta seção, apresentamos em detalhes os cenários práticos de uso do simulador. Para evidenciar o funcionamento interno da ferramenta. A reprodução dos experimentos pode ser realizada diretamente pelos notebooks Jupyter disponibilizados no repositório do projeto, preferencialmente no ambiente configurado via Docker descrito no *README*, embora essa estratégia não seja obrigatória. A partir de um ambiente previamente configurado, a execução deste caso de uso é realizada diretamente no notebook `demo_attack.ipynb` e `demo_purification.ipynb` disponíveis no diretório `/examples`². Para reproduzir o experimento, basta abrir os arquivos e executar sequencialmente todas as células.

B.1. Simulação de ataques a repetidores quânticos

No caso de uso 4.1 Simulação de ataques a repetidores quânticos, o resultado esperado é a geração de duas visualizações comparativas que evidenciam o impacto de um ataque do tipo *black hole repeater* sobre o repetidor R2.

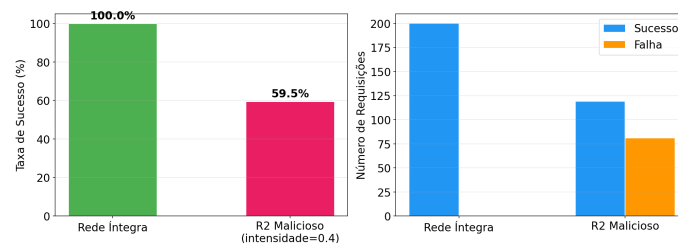


Figura 2. Rede íntegra vs. R2 malicioso.

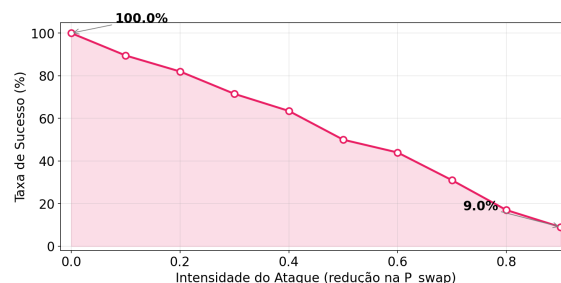


Figura 3. Impacto da intensidade do ataque.

Na Figura 2, compara-se a taxa de sucesso da rede em duas condições: uma rede íntegra, em que todos os repetidores operam normalmente, e uma rede comprometida, em

²<https://github.com/quantumgercom/QuantumNet/tree/main/examples>

que R2 atua de forma maliciosa ao reduzir a probabilidade de sucesso do *entanglement swapping*.

O segundo gráfico, representado na Figura 3, apresenta uma análise de sensibilidade em relação à intensidade do ataque, mostrando a degradação progressiva da taxa de sucesso à medida que aumenta a penalização imposta ao processo de *swapping*. Essa visualização permite observar que o comprometimento do repetidor afeta diretamente a conectividade quântica estabelecida entre os nós extremos, reforçando como falhas maliciosas em elementos intermediários podem comprometer a operação global da rede mesmo sem alterar explicitamente sua topologia.

B.2. Agendamento de purificação na camada de enlace

No caso de uso 4.2 Agendamento de purificação na camada de enlace, o resultado esperado é a produção de uma saída textual detalhada que descreve, passo a passo, a execução do processo de purificação em um canal sujeito a ruído do tipo *Werner*. Na configuração apresentada no notebook, o experimento utiliza um pool de reserva com seis pares EPR adicionais, permitindo que o agendador híbrido reaja a falhas probabilísticas ocorridas durante as rodadas de purificação. Na última célula no notebook, observa-se na saída final o provisionamento inicial do canal, o início da estratégia simétrica, as tentativas de recuperação acionadas após falhas em rodadas intermediárias e a conclusão bem-sucedida da purificação. Como comportamento esperado, o texto final evidencia que, mesmo sob as mesmas condições ruidosas em que uma abordagem estática falharia, o uso do pool de reserva permite evitar o aborto do processo e completar a purificação com sucesso. No cenário demonstrado, a execução termina com fidelidade final de aproximadamente 0,926396, confirmando que o mecanismo de agendamento híbrido consegue restaurar a execução diante de falhas probabilísticas e preservar a viabilidade do enlace quântico.

C. Interface Gráfica

A interface gráfica do QuantumNet foi concebida para concentrar a configuração dos principais elementos da preparação de experimentos e simulações. No arquivo README estão listados os passos para executar a interface gráfica. A figura 4, dividida em 3 partes, demonstra um exemplo de uso dessa interface gráfica:

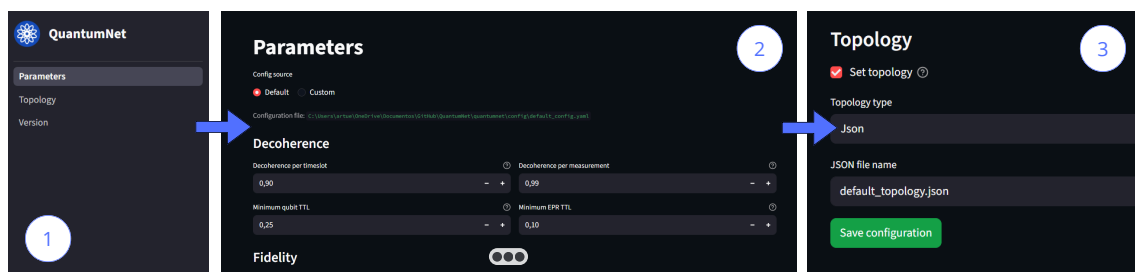


Figura 4. Interface gráfica do QuantumNet para seleção e configuração de parâmetros da simulação.

Na parte 1 é possível visualizar a barra lateral que reúne três seções principais da interface: *Parameters*, *Topology* e *Version*. Na parte 2, seção de parâmetros, a interface mostra os atributos configuráveis e padronizados da rede. Esses são valores que influenciam diretamente o comportamento da simulação. Cada elemento apresenta um ícone de

ajuda contextual, acessível ao passar o cursor do mouse, que descreve o significado do parâmetro e o impacto esperado de sua modificação sobre a rede. A parte **3** mostra o final da página de parâmetros, que trata da definição da topologia a ser utilizada na simulação. O usuário pode construir uma topologia durante o próprio *script*, basta não marcar o botão *Set Topology*. Mas, se preferir, pode utilizar uma topologia padrão previamente definida ou a partir de um JSON, desde que explicito o nome do arquivo no campo indicado. Em seguida, ao clicar no botão de salvar, essas informações são persistidas em um arquivo de configuração em formato YAML, presentes no diretório `config`.

Ao selecionar no menu lateral para a seção *Topology*, a Figura 5, dividida em 3 partes, mostra a seção dedicada à edição da topologia propriamente dita.

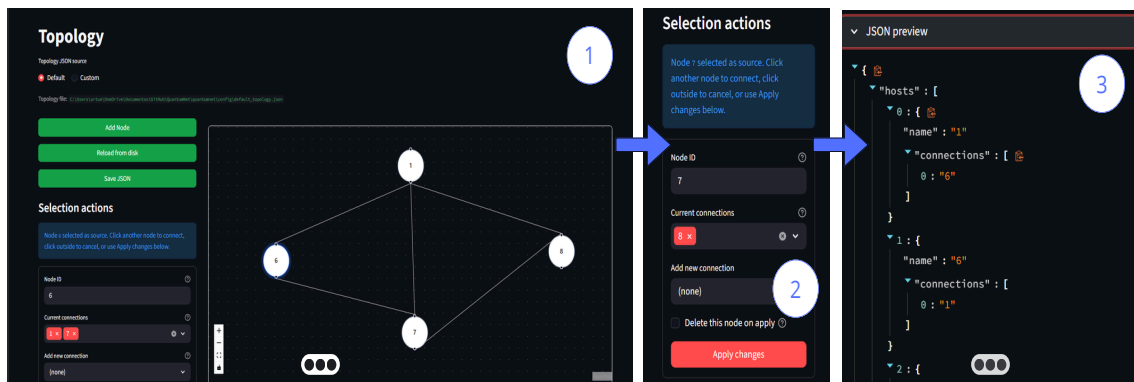


Figura 5. Interface gráfica do QuantumNet para construção e edição da topologia da rede, incluindo (1) área visual interativa para manipulação dos nós e conexões, (2) painel de configuração dos elementos selecionados e (3) visualização do arquivo JSON gerado.

A parte **1** mostra a tela onde o usuário interage com uma lousa para construção e modificação visual da rede. Aqui é possível adicionar novos nós, remover elementos existentes e realizar os ajustes conforme a necessidade do cenário. Dentro desse fluxo, o usuário pode optar por trabalhar com um arquivo JSON próprio ou reutilizar um arquivo padrão já previsto pela configuração geral. A parte **2**, ao selecionar um nó, a interface abre um formulário para aquele elemento, no qual são disponibilizadas as opções de configuração correspondentes, além de controles auxiliares para persistência e recuperação do cenário em edição. Assim como ocorre na seção de parâmetros, cada atributo configurável é acompanhado de um ícone de interrogação, que informa ao usuário o efeito da alteração realizada. Por último, na parte **3**, é possível acompanhar a prévia do arquivo JSON.

A relação entre a topologia e os parâmetros é mantida por meio da referência definida na seção de parâmetros: ao indicar no arquivo global o nome exato da topologia desejada, torna-se possível associar corretamente a configuração global da rede ao arquivo JSON correspondente. As informações globais e a descrição da topologia permanecem armazenadas em arquivos distintos, porém relacionados entre si. Para entender como utilizar essa estratégia de arquivos, o Notebook `demo_default_topology.ipynb`, presente no diretório `examples` do repositório, mostra um exemplo de uso dos arquivos de configuração da rede e da topologia para a criação de um script de simulação.