

Desafios e Oportunidades de Pesquisa para o Roteamento em Redes Quânticas

Diego Abreu¹, Antônio Abelém¹ Christian R. Esteve Rothenberg²

¹Universidade Federal do Pará (UFPA)

²Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

diego.abreu@itec.ufpa.br, abelem@ufpa.br, chesteve@dca.fee.unicamp.br

Abstract. *Communication between quantum devices has been advancing towards networks of complex topologies and long distances. However, intrinsic limitations of quantum signals mean that they cannot be replicated or amplified, making it difficult to adopt traditional routing techniques. Furthermore, the heterogeneity of technologies and different hardware implementations, and the lack of a well-defined Internet network stack model, open up several challenges to fully realize communication between quantum devices. Thus, this article presents the main challenges in the development of algorithms and routing protocols for quantum networks and discusses possible alternatives that are being developed.*

Resumo. *A Comunicação entre dispositivos quânticos vem avançando em direção a redes de topologias complexas e de longa distâncias. No entanto, limitações intrínsecas dos sinais quânticos fazem com que eles não possam ser replicados ou amplificados, dificultando a adoção das técnicas tradicionais de roteamento. Além disso, a heterogeneidade de tecnologias e diferentes implementações de hardware, e a falta de um modelo de pilha de rede de Internet bem definido abrem diversos desafios para se realizar plenamente a comunicação entre dispositivos quânticos. Assim, este artigo apresenta os principais desafios no desenvolvimento de algoritmos e protocolos de roteamento para redes quânticas e discute possíveis alternativas que estão sendo desenvolvidas.*

1. Introdução

A comunicação quântica consiste na troca de informações quânticas ou no compartilhamento de estado quântico entrelaçado entre duas ou mais partes e é regida pelas leis da mecânica quântica, com fenômenos sem contrapartida em redes clássicas - como não-clonagem, medição quântica, emaranhamento (ou entrelaçamento) e teletransporte [Nielsen 2010]. Estes fenômenos impõem restrições específicas e novos desafios ao projeto de redes e seus respectivos protocolos, como por exemplo os protocolos de roteamento.

Os algoritmos de roteamento mais utilizados em redes tradicionais, nomeadamente os algoritmos de Dijkstra e Bellman-Ford e suas respectivas implementações em protocolos padronizados (OSPF e RIP), não podem ser diretamente aplicados em redes quânticas por diversos fatores. Por exemplo, em redes quânticas, os estados quânticos entrelaçados são armazenados nas memórias quânticas locais dos nós quânticos. Uma

falha de memória quântica em um nó quântico particular pode destruir várias conexões entrelaçadas, provocando graves danos à rede. Um evento de falha de memória quântica torna a determinação imediata e eficiente dos caminhos de substituição mais curtos, resolvido por meio do algoritmo de Dijkstra no contexto de redes tradicionais, um problema emergente em um cenário de redes quânticas.

Outra situação que torna a adoção direta dos algoritmos e protocolos tradicionais de roteamento pouco adequada ao contexto de redes quânticas é que os nós têm que armazenar informações sobre toda a topologia da rede (como no caso de Dijkstra). No contexto de redes quânticas, cada nó é um pequeno computador quântico que pode armazenar e operar com alguns qubits, considerando a tecnologia atual. Em resumo, as particularidades da mecânica quântica criaram novos requisitos para os algoritmos e protocolos de roteamento para redes quânticas, como armazenamento de poucas informações, consumo reduzido de memória, pouco tempo no processamento do roteamento e na reposição dos entrelaçamentos consumidos, bem como maior distribuição destes, não necessariamente via o caminho mais curto, criando novas perspectivas de pesquisas no tema [Abelem et al. 2020].

Além disso, o processo de teletransporte destrói o entrelaçamento como consequência. Portanto, se qubits adicionais precisam ser teletransportados, novos pares entrelaçados precisam ser criados e distribuídos entre a origem e o destino. Esta restrição também não tem contrapartida em redes clássicas e deve ser cuidadosamente considerada na camada de rede [Kumar et al. 2019].

Diante de tais desafios e da importância do tema para as redes quânticas, uma vez que o roteamento determina a capacidade de redes quânticas realizarem teletransporte entre dispositivos quânticos, diversificadas propostas de algoritmos e protocolos de roteamento para redes quânticas vêm sendo apresentadas [Pant et al. 2019, Shi and Qian 2020, Gyongyosi and Imre 2020]. Este trabalho contribui com uma apresentação de desafios (Seção 2) de roteamento para redes quânticas, bem como discute (Seção 3) importantes aspectos relacionados com as soluções que estão sendo propostas, enfatizando interessantes oportunidades de pesquisa no tema. Finalmente, são apresentadas considerações finais (Seção 4) e sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2. Roteamento em Redes Quânticas

Uma rede quântica deve ser capaz de enviar qubits de um nó para outro, ou equivalentemente, estabelecer o entrelaçamento entre eles. Assim, a questão fundamental do roteamento de informações quânticas é gerenciar o entrelaçamento e permitir que a comunicação seja roteada de forma eficiente para o destino correto, mesmo quando muitos nós da rede se comunicam simultaneamente [Schoute et al. 2016].

No entanto, os sinais quânticos são fracos e muito frágeis e não podem ser copiados ou amplificados. Para trocar dados a longas distâncias, em redes topologicamente complexas construídas com tecnologias heterogêneas e gerenciadas por organizações independentes, são necessários repetidores quânticos, além de cuidado com ruído e com a perda.

De forma geral, os repetidores quânticos devem ser capazes de realizar quatro principais tarefas [Van Meter et al. 2021]:

1. **Criação do entrelaçamento base:** A principal tarefa dos repetidores quânticos é criar os entrelaçamentos que serão utilizados pelos nós quânticos da rede.
2. **Extensão do entrelaçamento:** Usando *entanglement swapping*, dois entrelaçamentos, um entre o nó A e o nó B, e outro entre o nó B e o nó C, podem ser combinados para se criar um entrelaçamento novo entre o nó A e o nó C.
3. **Gerenciamento de Erro:** O repetidor deve ser capaz de lidar com erros gerados pela perda de fótons, erros de estado e de operações quânticas [MA et al. 2015]. Formas de correção de erro quânticas podem ser utilizadas para mitigar o erro.
4. **Operações de Rede:** Os repetidores devem monitorar o estado dos nós, fazer o roteamento, multiplexação e outras operações da rede.

O entrelaçamento compartilhado, juntamente com um canal de comunicação clássico, formam o Enlace Quântico Virtual (*virtual quantum link* - EQV) [Kauffman and Lomonaco 2002]. Esses enlaces quânticos entre as estações repetidoras e os nós finais são estabelecidos por meio de canais fotônicos.

Dois tipos de canais fotônicos podem ser considerados: canais de espaço livre, potencialmente via satélites [Yin et al. 2017], e canais baseados em fibra. Cada um tem suas próprias vantagens e desvantagens, e uma futura Internet quântica pode usar uma combinação deles, semelhante à Internet clássica atual. Provavelmente, arquiteturas híbridas serão utilizadas para conexões com o uso de crio-cabos (caros e necessariamente limitados em comprimento) e de fibras ópticas ou links fotônicos de espaço livre, exigindo que esses canais exibam perda mínima de fótons e de decoerência. A Figura 1 exemplifica a criação de um enlace quântico virtual.

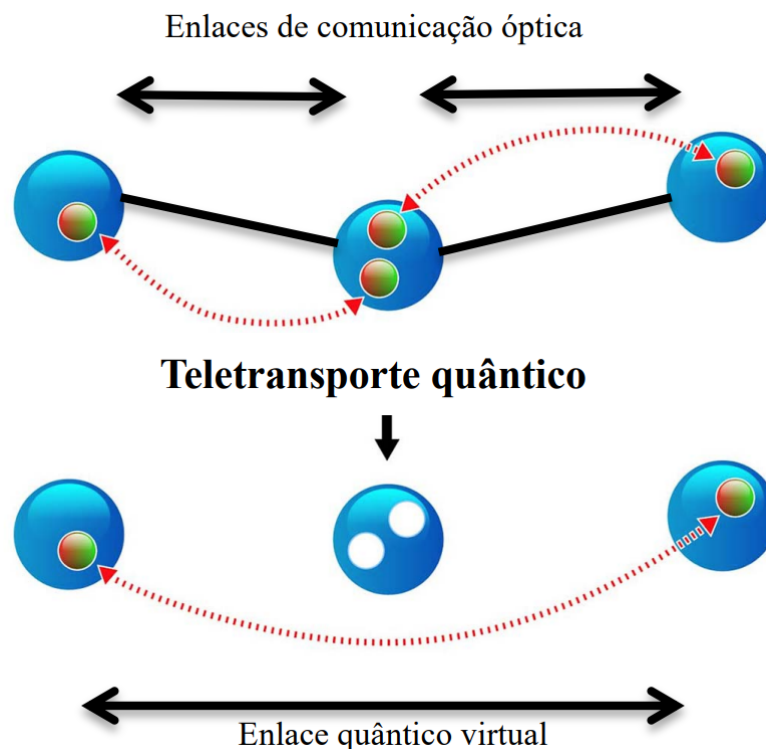


Figura 1. Enlace quântico virtual - EQV (Figura adaptada de [Wehner et al. 2018])

O desafio do roteamento entre EQVs então é achar os melhores caminhos entre os nós, de forma a minimizar a quantidade de qubits necessários na memória de cada nó. Além disso, é importante reduzir o tempo de computação e o uso de memória clássica necessária em cada nó para armazenar e processar informações de roteamento. Quanto mais a comunicação clássica demorar, maior será o tempo de vida necessário para se manter o qubit na memória quântica do nó.

3. Oportunidades de Pesquisa em Protocolos de Roteamento para Redes Quânticas

O projeto de bons protocolos de roteamento pode explorar diferentes questões: primeiro, pode-se decidir como deve ser a topologia da rede de entrelaçamentos. Como os entrelaçamentos podem, em princípio, ser estabelecidos entre qualquer par de nós, uma abordagem ingênua seria estabelecer um grafo de entrelaçamentos totalmente conectado. No entanto, não se deve esquecer que cada entrelaçamento precisa de um qubit de memória quântica em cada nó de extremidade, tornando essa abordagem extremamente custosa. Uma alternativa seria considerar o estabelecimento de entrelaçamentos em tempo real sempre que ficar claro que é necessário formar um enlace entrelaçado de longa distância entre dois nós. Embora isso possa ser viável no regime de operações quânticas totalmente paralelas e perfeitas, criar entrelaçamentos antecipadamente, aparenta ser mais vantajoso, pois podem ser de melhor qualidade, realizando destilação de entrelaçamento, que consome muito tempo para executar em tempo real [Schoute et al. 2016].

A seguir elencamos algumas áreas que apresentam oportunidades de pesquisa no desenvolvimento de protocolos de roteamento para redes quânticas.

Métricas de roteamento. Novas métricas de roteamento quântico são necessárias para garantir uma seleção de caminho ciente de entrelaçamentos que seja eficiente. Além disso, o processo de teletransporte destrói o entrelaçamento como consequência. Portanto, se qubits adicionais precisam ser teletransportados, novos pares entrelaçados precisam ser criados e distribuídos entre a origem e o destino. Esta restrição não tem contrapartida em redes clássicas e deve ser cuidadosamente considerada na camada de rede [Kumar et al. 2019]. Nesse contexto, pode-se considerar diferentes abordagens, dependendo do objetivo da rede, entre elas utilizar princípios das redes definidas por software (SDN – *Software Defined Networks*) para gerenciar de forma mais flexível e programável, tanto a rede clássica como a rede quântica. Separando o plano de dados e de controle quântico é possível reduzir drasticamente o esforço de integração de novos dispositivos e tecnologias na rede e permite endereçar o projeto de redes quânticas versáteis por meio do desenvolvimento de switches quânticos programáveis [Humble et al. 2018, Kozłowski et al. 2020].

Pacote quântico. Atualmente, não há noção de um “Pacote Quântico” - um estado quântico fotônico junto com cabeçalhos apropriados que funcionam como uma única unidade de dados que atravessa a rede quântica. Como apenas versões preliminares de pilhas de rede existem atualmente para uma Internet quântica [Van Meter et al. 2021], isso representa um grande problema em aberto e sua solução requer um esforço multidisciplinar, abrangendo desde a teoria da comunicação e comunidades de engenharia, como a de engenharia de rede.

Switches quânticos. Outro aspecto importante e desafiador é o desenvolvimento de swit-

ches para redes quânticas a partir dos repetidores quânticos [Humble et al. 2018]. Os switches feitos de material optoeletrônico acabam adicionando muito ruído ao qubit e até acabam destruindo a informação quântica. Já os switches feitos de materiais microeletrônicos até são capazes manter o entrelaçamento, mas operam em uma velocidade muito baixa para as aplicações de rede.

Socket quântico. Um fator relevante é como aplicações podem acessar os serviços providos pela rede quântica e como os componentes clássicos podem se comunicar com os componentes quânticos. Uma forma de socket quântico, assim como a sua versão clássica, deve ser capaz de prover esse acesso para fins de multiplexação/demultiplexação, lidando com diferentes formas de aplicações, tanto as que vão utilizar os qubits em outras operações quânticas e quanto com as que medem os qubits para produzir informação clássica.

4. Conclusões e Trabalhos Futuros

Embora ainda não seja possível definir quais serão os componentes físicos exatos e qual será o layout geral de uma futura Internet quântica, é provável que veremos o nascimento das primeiras redes quânticas multinós nos próximos anos. Contudo, os principais fornecedores de tecnologia da informação que investem em computação quântica, como Google, IBM e Microsoft, e outros no setor de telecomunicações ainda veem as redes quânticas como um investimento de alto risco. Isso significa que o governo deve desempenhar um papel ativo de indutor deste desenvolvimento, incentivando investimentos do setor privado. Como um ator neutro, o governo também pode facilitar o desenvolvimento de padrões que serão críticos na construção de subsistemas interoperáveis, essenciais para as telecomunicações quânticas.

Como trabalhos futuros, aprovamos projeto junto à FAPESP¹ para desenvolver algoritmos e protocolos de roteamento que assegurem a descoberta da melhor rota em diferentes topologias de redes quânticas. Planeja-se desenvolver e analisar a solução, tanto no contexto de redes quânticas convencionais como de redes quânticas definidas por software.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do processo no 2020/04031-1.

Referências

- Abelem, A., Vardoyan, G., and Towsley, D. (2020). *Quantum Internet: The Future of Internetworking*. In: *Minicursos do 38o SBRC*. SBC.
- Gyongyosi, L. and Imre, S. (2020). Routing space exploration for scalable routing in the quantum internet. *Scientific reports*, 10(1):1–15.
- Humble, T. S., Sadlier, R. J., Williams, B. P., and Prout, R. C. (2018). Software-defined quantum network switching. In *Disruptive Technologies in Information Sciences*, volume 10652, pages 72 – 79. SPIE.
- Kauffman, L. H. and Lomonaco, S. J. (2002). Quantum entanglement and topological entanglement. *New Journal of Physics*, 4(1):73.

¹<https://bv.fapesp.br/pt/auxilios/109781/protocolos-de-roteamento-para-internet-quantica/?q=2020/04031-1>

- Kozłowski, W., Kuipers, F., and Wehner, S. (2020). A p4 data plane for the quantum internet. *Proceedings of the 3rd P4 Workshop in Europe*.
- Kumar, S., Lauk, N., and Simon, C. (2019). Towards long-distance quantum networks with superconducting processors and optical links. *Quantum Science and Technology*, 4(4):045003.
- MA, H.-y., GUO, Z.-w., FAN, X.-k., and WANG, S.-m. (2015). The routing communication protocol for small quantum network based on quantum error correction code. *ACTA ELECTRONICA SINICA*, 43(1):171.
- Nielsen, Michael A. and Chuang, I. (2010). *Quantum computation and quantum information: 10th Anniversary Edition*. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- 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):1–9.
- Schoute, E., Mancinska, L., Islam, T., Kerenidis, I., and Wehner, S. (2016). Shortcuts to quantum network routing.
- Shi, S. and Qian, C. (2020). Concurrent entanglement routing for quantum networks: Model and designs. In *Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, pages 62–75.
- Van Meter, R., Satoh, R., Benchasattabuse, N., Matsuo, T., Hajdušek, M., Satoh, T., Nagayama, S., and Suzuki, S. (2021). A quantum internet architecture. *arXiv preprint arXiv:2112.07092*.
- Wehner, S., Elkouss, D., and Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412):eaam9288.
- Yin, J., Cao, Y., Li, Y.-H., Liao, S.-K., Zhang, L., Ren, J.-G., Cai, W.-Q., Liu, W.-Y., Li, B., Dai, H., Li, G.-B., Lu, Q.-M., Gong, Y.-H., Xu, Y., Li, S.-L., Li, F.-Z., Yin, Y.-Y., Jiang, Z.-Q., Li, M., Jia, J.-J., Ren, G., He, D., Zhou, Y.-L., Zhang, X.-X., Wang, N., Chang, X., Zhu, Z.-C., Liu, N.-L., Chen, Y.-A., Lu, C.-Y., Shu, R., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., and Pan, J.-W. (2017). Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*, 356(6343):1140–1144.