

Purificação de Links Virtuais para Mitigar a Degradação de Fidelidade em Redes Quânticas Multi-salto

David Tavares¹, Diego Abreu¹, Antônio Abelém¹

¹Universidade Federal do Pará - UFPA

diego.abreu@itec.ufpa.br

Abstract. *Successive entanglement swapping operations degrade end-to-end fidelity in multi-hop quantum networks. This work investigates a preliminary strategy that applies purification to intermediate virtual links under bit-flip noise. Comparing the baseline with a moderate-redundancy scenario, results show that virtual-link purification expands the feasible operating region of the network.*

1. Introdução

A Internet Quântica viabiliza aplicações como comunicação segura e computação quântica distribuída [Kimble 2008, Wehner et al. 2018]. Em redes multi-salto, porém, a distribuição de emaranhamento depende de operações sucessivas de *entanglement swapping*, que degradam progressivamente a fidelidade do enlace fim a fim [Dür et al. 1999]. Nesse contexto, mecanismos de purificação tornam-se relevantes para ampliar a viabilidade de requisições com fidelidade mais elevada.

Neste trabalho, investigamos uma estratégia preliminar de purificação aplicada diretamente a *links virtuais*. A ideia é restaurar a fidelidade de enlaces lógicos intermediários antes de novas etapas de swapping. Como estudo inicial, comparamos o swapping convencional a uma configuração com redundância moderada e purificação sobre links virtuais sob ruído *bit-flip*.

2. Purificação sobre Links Virtuais e Avaliação

A proposta considera múltiplos pares de bell (EPR) por etapa da rota, permitindo formar enlaces virtuais redundantes entre nós não adjacentes. Esses enlaces são então submetidos a purificação simétrica em cascata, gerando um único par de maior fidelidade para ser utilizado nas etapas seguintes. Diferentemente de estratégias restritas aos enlaces físicos, a abordagem atua sobre enlaces lógicos intermediários, buscando conter a degradação acumulada do swapping sequencial.

A avaliação compara dois cenários sob ruído *bit-flip*. No baseline [1, 1], apenas um par EPR é alocado por enlace, inviabilizando a purificação e restringindo a comunicação ao swapping simples. No cenário [2, 2], a alocação de dois pares por etapa permite redundância e purificação sobre links virtuais. O desempenho é medido pela taxa de sucesso das requisições, definida como a probabilidade de entregar um par fim a fim que satisfaça uma fidelidade alvo, dada a fidelidade inicial dos enlaces físicos.

A Figura 1 mostra que, no cenário [1, 1], o swapping simples impõe uma fronteira rígida de atendimento, limitando fortemente as requisições viáveis. Já no cenário [2, 2], a introdução de redundância e purificação desloca essa fronteira, ampliando a região em

que a rede consegue atender fidelidades alvo mais elevadas. Esse ganho, porém, ocorre de forma probabilística, refletindo o custo estocástico da purificação.

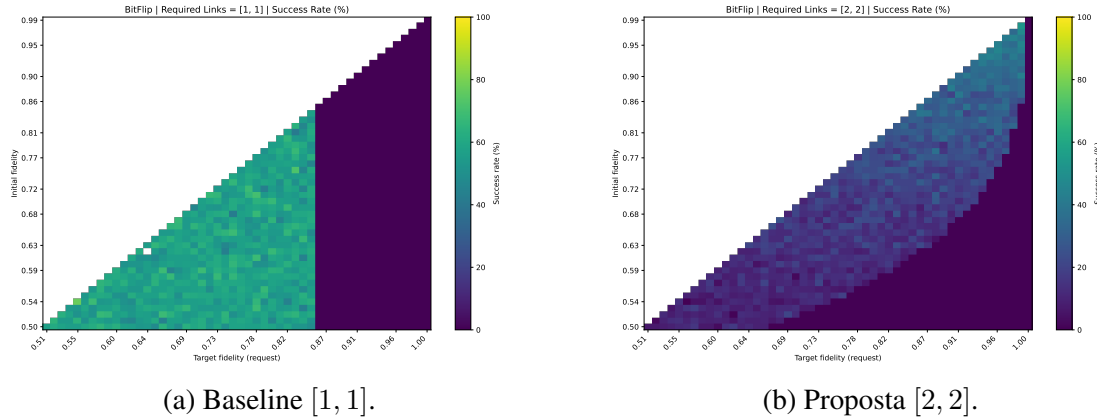


Figura 1. Taxa de sucesso no canal *bit-flip*. A purificação sobre links virtuais amplia a região de requisições atendíveis em relação ao swapping convencional.

3. Conclusão

Apresentamos uma estratégia preliminar de purificação sobre links virtuais para redes quânticas multi-salto. Os resultados sob ruído *bit-flip* indicam que, mesmo com redundância moderada no cenário [2, 2], a proposta amplia a região viável de operação da rede em comparação ao baseline sem purificação. Como continuidade, pretendemos investigar mecanismos adaptativos para ajuste dinâmico dos recursos de purificação em diferentes condições de canal.

Disponibilidade de Artefatos

Os artefatos estão disponíveis no repositório referente ao artigo ¹.

4. 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

- Dür, W., Briegel, H.-J., Cirac, J. I., and Zoller, P. (1999). Quantum repeaters based on entanglement purification. *Physical Review A*, 59:169–181.
- Kimble, H. J. (2008). The quantum internet. *Nature*, 453(7198):1023–1030.
- Wehner, S., Elkouss, D., and Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412):eaam9288.

¹<https://github.com/quantumgercom/Link-Layer-Schudeling>