

Análise de fidelidade em portas quânticas via aprendizado de máquina

Carlos Eduardo, André Lopes e Rosiane de Freitas

Resumo— Este trabalho apresenta uma abordagem de aprendizado de máquina para estimar a fidelidade de portas quânticas a partir de variáveis operacionais típicas da era NISQ, como tipo de porta, profundidade, número de qubits e taxa de despolarização. Foram avaliados cinco modelos de regressão supervisionada — Regressão Linear, Random Forest, XGBoost, Multi-Layer Perceptron (MLP) e Support Vector Regressor (SVR) otimizado — com validação cruzada. Os resultados destacam alto desempenho, especialmente em modelos baseados em árvores e regressão linear, com R^2 acima de 0,948, mostrando ser possível substituir métodos custosos como *tomografia quântica* e *randomized benchmarking*.

Palavras-Chave— aprendizado de máquina, circuitos quânticos, computação quântica, decoerência, portas quânticas.

Abstract— This work presents a machine learning approach to estimate the fidelity of quantum gates using operational variables typical of the NISQ era, such as gate type, depth, number of qubits, and depolarization rate. Five supervised regression models were evaluated — Linear Regression, Random Forest, XGBoost, Multi-Layer Perceptron (MLP), and optimized Support Vector Regressor (SVR) — with cross-validation. Results highlight high performance, especially for tree-based models and linear regression, with R^2 above 0.948, demonstrating that fidelity can be learned from operational data, enabling replacement of costly methods such as quantum tomography and randomized benchmarking.

Keywords— decoherence, quantum circuits, quantum computing, quantum gates, machine learning.

I. INTRODUÇÃO

A computação quântica tem avançado rapidamente, com dispositivos reais surgindo e que operam uma quantidade cada vez maior de qubits, de diferentes tipos, como supercondutores e íons aprisionados, exigindo análises precisas do desempenho em cenários ruidosos típicos da era NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*) [3]. A fidelidade, que mede a proximidade entre um estado quântico real e o ideal, é um parâmetro fundamental para avaliar a qualidade das portas/circuitos lógicos e a confiabilidade dos protocolos quânticos [6][2]. Sob a suposição de ruído local e independente, a fidelidade total de um circuito pode ser aproximada pelo produto das fidelidades individuais das portas que o compõem, uma abordagem validada tanto em simulações quanto em aplicações reais experimentais, sendo particularmente adequada para dispositivos NISQ [6][8]. Neste trabalho, é explorada uma abordagem de estimativa de fidelidade quântica usando modelos de aprendizado de máquina, contextualizando com a literatura e com resultados promissores, como apresentado a seguir.

¹Carlos Eduardo, ¹André Lopes, ¹Rosiane de Freitas. ¹Instituto de Computação, Universidade Federal do Amazonas, Manaus- AM, e-mails: {carlos.santos, andre.teixeira, rosiane}@icompu.ufam.edu.br.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos relacionados revelam avanços significativos na previsão da fidelidade em sistemas quânticos, destacando tanto os desafios quanto as soluções propostas na literatura recente. Métodos tradicionais como *randomized benchmarking* e *quantum tomography* são reconhecidos por sua precisão, porém apresentam limitações práticas devido à baixa escalabilidade e ao elevado custo experimental, especialmente frente ao aumento da dimensionalidade dos sistemas quânticos [6]. As dificuldades inerentes à presença de ruído e decoerência tornam ainda mais complexa a caracterização precisa da fidelidade por abordagens convencionais, motivando a busca por alternativas mais eficientes [4].

Técnicas de aprendizado de máquina emergem como alternativas robustas e promissoras neste cenário. Pesquisas recentes demonstram que modelos supervisionados podem prever a fidelidade de circuitos complexos a partir de amostras simples, mesmo na ausência de ruído, superando limitações dos métodos tradicionais[6]. São também propostas estimativas diretas da fidelidade usando redes neurais básicas, alcançando bons resultados mesmo com um número reduzido de medições[7]. Ademais, demonstra-se que a fidelidade quântica é uma propriedade passível de aprendizado até por modelos clássicos de regressão, descontando-se a possível falta de complexidade dos dados envolvidos [5].

Complementarmente, evidencia-se a importância de algoritmos como SVM, MLP e XGBoost na mitigação dos efeitos do ruído e no controle das variáveis operacionais em sistemas NISQ, consolidando essas técnicas como instrumentos eficazes para otimizar o desempenho dos circuitos quânticos[4]. Além disso, a fidelidade assume um papel fundamental que vai além de uma simples métrica física, orientando decisões operacionais cruciais em redes quânticas, tais como a seleção de rotas e a execução de protocolos de purificação[2].

Assume-se que, sob ruído local e independente, a fidelidade total de um circuito pode ser aproximada pelo produto das fidelidades das portas individuais. Ao estimar a fidelidade de cada porta usando modelos de aprendizado de máquina — a partir das métricas operacionais extraídas dos circuitos —, obtém-se uma estimativa eficiente e escalável da fidelidade global por meio da composição multiplicativa, conforme destacado por [6]. Dessa forma, esses avanços sustentam o uso de algoritmos supervisionados para prever a fidelidade de portas quânticas com base em métricas operacionais extraídas diretamente de dados experimentais.

III. PROTOCOLO EXPERIMENTAL

O experimento foi estruturado para avaliar a capacidade preditiva de diferentes algoritmos supervisionados na estimação da fidelidade de portas quânticas, seguindo um fluxo metodológico composto por preparação dos dados, definição de modelos, validação cruzada e análise de desempenho. Esse protocolo foi delineado em conformidade com diretrizes recentes, voltadas à aplicação de técnicas escaláveis para cenários ruidosos e de média escala, característicos da era NISQ [4].

A base de dados reúne métricas de desempenho de 13 portas quânticas distintas — incluindo H, X, CNOT, Toffoli e Fredkin — em 1000 execuções sob regimes com e sem ruído. Cada instância contempla informações como tipo de porta, número de qubits, profundidade do circuito, tempo de execução, taxa de erro, fidelidade (variável-alvo), consumo de energia e parâmetros de ruído, configurando-se como um recurso abrangente e apropriado para modelagem supervisionada da fidelidade.

IV. RESULTADOS

Os resultados obtidos no estudo evidenciam que os modelos de aprendizado supervisionado são eficazes na previsão da fidelidade de portas quânticas a partir de variáveis operacionais como profundidade do circuito, tipo de porta, número de qubits e taxa de despolarização. Conforme destacado na literatura, a fidelidade total de um circuito pode ser estimada pela multiplicação das fidelidades individuais das portas que o compõem, sob a suposição de ruído local e independente [6][8].

$$F_{circuito} \approx \prod_{i=1}^N F_{porta_i}$$

Modelos baseados em árvores, como *Random Forest* (RF) e *XGBoost*, juntamente com a regressão linear (*Linear Regressor*, LR), exibiram desempenho superior, alcançando valores de R^2 em torno de 0.9483, baixo erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), além de apresentarem baixa variabilidade entre as amostras de validação cruzada [6]. O modelo de rede neural Multi-Layer Perceptron (MLP) também apresentou resultados competitivos, com R^2 muito próximo (0.9480) e desempenho robusto mesmo em condições ruidosas.

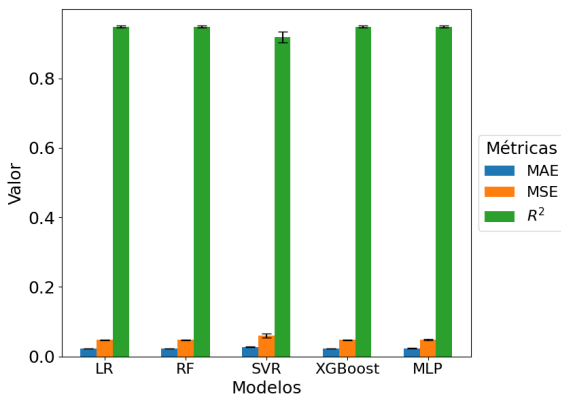


Fig. 1. Métricas dos modelos

A análise dos resultados confirma que a fidelidade quântica é uma propriedade que pode ser aprendida a partir de métricas estruturais e operacionais do circuito, viabilizando estimativas precisas e escaláveis que podem ser calculadas pela composição multiplicativa das fidelidades das portas, substituindo métodos tradicionais custosos como *quantum tomography* ou *randomized benchmarking*. Tais conclusões reforçam o potencial de aplicações em monitoramento em larga escala e em sistemas embarcados para comunicação e computação quântica, em consonância com evidências recentes da literatura [4][2].

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram exploradas condições que melhor estimam a fidelidade de portas quânticas a partir de variáveis operacionais e estruturais dos circuitos, utilizando modelos de aprendizado supervisionado como LR, RF, XGBoost, MLP e SVR otimizado. Os resultados indicam alta precisão desses modelos, reforçando a viabilidade de substituir métodos tradicionais custosos e complexos, como *quantum tomography* e *randomized benchmarking*, especialmente em sistemas NISQ e aplicações de larga escala [6][4]. Entretanto, cabe ressaltar que os altos valores das métricas também podem indicar que a base de dados utilizada é simples e que não traz dificuldades maiores na aprendizagem. Sendo assim, como trabalho em andamento, está sendo feita uma análise exploratória dos dados, bem como investigada outras bases de dados, de modo a se caracterizar um problema de maior complexidade para a estimativa de fidelidade. Como próximos passos também, propõe-se investigar se a fidelidade total dos circuitos pode ser estimada por meio da multiplicação das fidelidades individuais das portas quânticas, explorando assim a composição multiplicativa destacada em estudos anteriores, o que potencialmente ampliaria a aplicabilidade e escalabilidade da metodologia para a caracterização de circuitos mais complexos [8][6].

REFERÊNCIAS

- [1] Abir, Md Ismiel Hossen, Comprehensive Quantum Gate Performance Analysis: A Comparative Study of Noise and No-Noise Effects. *Mendeley Data*, V1 (2025). <https://doi.org/10.17632/kf5mbvft5t.1>
- [2] Dutta, H.; Bhuyan, A. K. Quantum communication: From fundamentals to recent trends, challenges and open problems. *arXiv preprint arXiv:2406.04492* (2024). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.04492>
- [3] Gujju, Y., et al. Quantum machine learning on near-term quantum devices: Current state of supervised and unsupervised techniques for real-world applications. *Phys. Rev. Applied* 21, 067001 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.21.067001>
- [4] Mahmud, I.; Abdelhadi, A. Artificial Intelligence in Quantum Communications: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, vol. 13, pp. 121174–121200 (2025). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3585799>
- [5] Amer, N. E., et al. On the learnability of quantum state fidelity. *EPJ Quantum Technol.* 9, 22 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-022-00149-8>
- [6] Vadali, A., et al. Quantum circuit fidelity estimation using machine learning. *arXiv preprint arXiv:2212.00677* (2022). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.00677>
- [7] Zhang, X., et al. Direct Fidelity Estimation of Quantum States using Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2102.02369* (2021). <https://arxiv.org/abs/2102.02369>
- [8] Escofet, P., et al. An Accurate and Efficient Analytic Model of Fidelity Under Depolarizing Noise Oriented to Large Scale Quantum System Design. *arXiv preprint arXiv:2503.06693* (2025). <https://arxiv.org/abs/2503.06693v1>