

# Framework Ciente da Rede para Análise de Viabilidade da Execução Distribuída de Algoritmos Variacionais Quânticos

Waldemir Cambiucci, Regina Melo Silveira

Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais  
Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo – SP – Brasil

waldemir.cambiucci@usp.br, regina@larc.usp.br

**Abstract.** *Variational Quantum Algorithms (VQA) are promising for near-term quantum computing, but their scalability remains limited by qubit count, noise, transpilation, and sampling cost. Distributed quantum computing can extend execution across multi-QPU settings, but its benefit depends on circuit structure, ansatz or mixer locality, partitioning quality, and communication overhead. This paper proposes a network-aware framework for Distributed VQA (D-VQA), combining hypergraph partitioning, ansatz-aware and mixer-aware strategies, and a cost-based view of execution, communication, synchronization, sampling, and reconstruction. The framework identifies viability regimes in which distribution is favorable, marginal, or dominated by network overhead.*

**Resumo.** *Algoritmos Variacionais Quânticos (VQA) são promissores para a computação quântica de curto prazo, mas sua escalabilidade ainda é limitada por número de qubits, ruído, transpilação e custo de amostragem. A computação quântica distribuída pode ampliar a execução em ambientes multi-QPU, mas seu benefício depende da estrutura do circuito, da localidade do ansatz ou do mixer, da qualidade do particionamento e do overhead de comunicação. Este artigo propõe um framework ciente da rede para VQA distribuídos (D-VQA), combinando particionamento hipergráfico, estratégias ansatz-aware e mixer-aware, e uma visão de custo sobre execução, comunicação, sincronização, amostragem e reconstrução. O framework identifica regimes de viabilidade em que a distribuição é favorável, marginal ou dominada pelo overhead de rede.*

## 1. Introdução

A computação quântica na era NISQ permanece limitada por número reduzido de qubits, ruído, conectividade imperfeita e alto custo de amostragem. Nesse contexto, Algoritmos Variacionais Quânticos (VQA) [STECHLY, 2024], como VQE e QAOA [GIOVAGNOLI, 2025], destacam-se por combinar circuitos parametrizados com otimização clássica e por se adaptarem melhor às restrições do hardware atual. Ainda assim, em problemas de otimização mais complexos, esses algoritmos continuam sujeitos a limitações de profundidade efetiva, overhead de transpilação e custo iterativo de medições [NOVÁK et al., 2025].

Uma alternativa para ampliar a escala de execução consiste em distribuir circuitos variacionais (D-VQA) [KIM et al., 2025] entre múltiplas QPUs. Arquiteturas multi-QPU, computação quântica distribuída e técnicas de corte de circuitos permitem executar

circuitos além da capacidade de uma única QPU, mas introduzem custos adicionais de comunicação, sincronização, reconstrução estatística e coordenação do processo variacional. Assim, a questão central não é apenas como particionar circuitos, mas em que condições a distribuição efetivamente compensa. No caso de VQA, essa viabilidade depende da interação entre estrutura do problema, localidade do ansatz e do mixer, qualidade do particionamento e custos do ambiente multi-QPU, tornando insuficientes abordagens puramente estruturais.

Neste contexto, este trabalho propõe um framework ciente da rede para análise de viabilidade de D-VQA. O diferencial da proposta não está apenas no uso de hipergrafos, mas em tratar a distribuição como uma decisão arquitetural sensível ao problema, ao circuito variacional e ao contexto de execução. Além disso, o trabalho incorpora duas perspectivas funcionais, **ansatz-aware** e **mixer-aware**, para capturar melhor a preservação de blocos variacionais e dependências relevantes à convergência e à qualidade da solução. As contribuições principais são três: **(i)** um framework que modela D-VQA como problema conjunto de algoritmo, arquitetura e rede; **(ii)** uma análise funcional sensível à localidade do ansatz e do mixer; e **(iii)** um **Score de Viabilidade Distribuída (DVS)** para classificar regimes favorável (*favorable*), marginal (*marginal*) e desfavorável (*unfavorable*). O escopo do artigo é conceitual-operacional: propomos um framework e um critério heurístico de apoio à decisão, acompanhados de validação exploratória inicial com benchmarks estruturais e perfis de rede simulados, sem pretender demonstrar uma vantagem prática universal da execução distribuída.

## 2. Conceitos Fundamentais

Algoritmos Variacionais Quânticos (VQA) resolvem problemas por meio da minimização iterativa de funções da forma

$$f(\theta) = \langle \psi(\theta) | H | \psi(\theta) \rangle \quad (1)$$

combinando circuitos quânticos parametrizados e otimização clássica. Em métodos como o Variational Quantum Eigensolver (VQE) e o Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), o Hamiltoniano  $H$  codifica o problema e o ansatz define a estrutura parametrizada do circuito. Embora essa abordagem seja mais adequada às restrições do hardware NISQ do que algoritmos quânticos mais profundos, sua execução ainda depende de sucessivas avaliações de observáveis, tornando profundidade, ruído e custo de amostragem fatores limitantes na prática.

Neste trabalho, distinguimos três estratégias de execução: monolítica, em que todo o circuito é executado em uma única QPU; circuit cutting, em que o circuito é fragmentado e recomposto por reconstrução estatística [BURT, 2026]; e D-VQA, em que diferentes partições são distribuídas entre múltiplas QPUs em ambiente multi-QPU. Essas estratégias impõem custos distintos. Na execução monolítica, a limitação principal decorre da capacidade da QPU; em circuit cutting, predominam os custos de reconstrução e amostragem; em D-VQA, surgem overheads adicionais de comunicação e sincronização entre partições. Embora grafos e hipergrafos sejam amplamente usados para apoiar o particionamento, em VQA o problema é mais sensível, pois o particionamento pode afetar não apenas a estrutura do circuito, mas também a convergência e a estabilidade do processo variacional. Assim, a escolha entre execução monolítica, circuit cutting e execução distribuída exige uma avaliação conjunta de circuito, particionamento e contexto de rede.

### 3. Framework Proposto

O framework proposto parte da hipótese de que a viabilidade da execução distribuída de Algoritmos Variacionais Quânticos depende da interação entre quatro dimensões: estrutura do problema, localidade funcional do circuito, qualidade do particionamento e custo do ambiente multi-QPU. Assim, a distribuição é tratada como decisão arquitetural sensível ao circuito, ao particionamento e ao contexto de execução.

Com base nessa visão, o framework organiza a análise de D-VQA em cinco etapas: formulação do problema, definição do circuito variacional, representação estrutural para particionamento, estimação de custos e classificação da viabilidade da distribuição. Para isso, o circuito é representado como um hipergrafo, permitindo aplicar heurísticas gráficas ou hipergráficas. Além da estrutura, o framework incorpora as perspectivas *ansatz-aware* e *mixer-aware*, relevantes porque, em VQA, o particionamento afeta não apenas a estrutura do circuito, mas também a convergência, a estabilidade e a qualidade da solução.

Como pano de fundo analítico, adotamos o seguinte modelo de custo total efetivo:

$$C_{total} = C_{local} + C_{comm} + C_{sync} + C_{sampling} + C_{recon} \quad (2)$$

onde  $C_{local}$  representa o custo de execução das partições,  $C_{comm}$  o custo de comunicação entre QPUs,  $C_{sync}$  o overhead de sincronização,  $C_{sampling}$  o número de medições exigido pelo laço variacional e  $C_{recon}$  o custo de reconstrução estatística. Importante destacar que esse modelo não pretende definir uma equação universal, mas fornecer uma estrutura comparativa para avaliar quando a redução de profundidade local e demanda de qubits compensa o overhead da distribuição para algoritmos VQA.

A partir desse pano de fundo, o framework é operacionalizado por meio do **Score de Viabilidade Distribuída (DVS)**. Enquanto o modelo de custo total fornece a estrutura analítica geral, o DVS atua como critério heurístico, agregando quatro fatores de benefício — modularidade do problema ( $M$ ), qualidade do particionamento ( $Q$ ), ganho de profundidade local ( $D$ ) e preservação da localidade variacional ( $L$ ) — e quatro fatores de overhead — comunicação ( $C$ ), sincronização ( $S$ ), reconstrução ( $R$ ) e amostragem híbrida ( $H$ ). A Tabela 1 resume a interpretação desses fatores e suas formas de estimação. No framework, todos os fatores são normalizados em  $[0, 1]$ , permitindo comparação relativa entre circuitos, estratégias de particionamento e perfis de rede. Essa normalização, assim como os limiares  $T^+$  e  $T^-$ , tem caráter heurístico e comparativo, e sua calibração mais precisa depende de validação empírica adicional.

Com base nessa formulação, distinguimos três regimes de viabilidade: **favorável**, quando os benefícios superam os overheads estimados; **marginal**, quando ganhos e custos permanecem próximos; e **desfavorável**, quando altos custos de comunicação e reconstrução ou baixa preservação funcional tornam a execução distribuída menos atrativa do que alternativas como execução monolítica ou corte de circuitos.

#### 3.1 Score de Viabilidade Distribuída

Para tornar o framework proposto mais operacional, definimos um Score de Viabilidade Distribuída (*Distributed Viability Score, DVS*) como um indicador heurístico de quando a execução variacional distribuída tende a compensar. O objetivo do score não é fornecer uma métrica universal exata, mas oferecer um critério para avaliar a atratividade da execução distribuída em relação à execução monolítica, podendo apoiar

de forma exploratória comparações com estratégias de corte de circuitos. O score é definido como a diferença entre o benefício estrutural da distribuição e o overhead introduzido pela distribuição:

$$DVS = B_{dist} - O_{dist} \quad (3)$$

em que:

$$B_{dist} = \frac{M+Q+D+L}{4} \quad O_{dist} = \frac{C+S+R+H}{4} \quad (4)$$

Todos os termos são normalizados no intervalo  $[0, 1]$ , de modo que valores mais altos indicam maior intensidade do efeito correspondente. O benefício  $B_{dist}$  reúne modularidade do problema ( $M$ ), qualidade do particionamento ( $Q$ ), ganho de profundidade local ( $D$ ) e preservação da localidade variacional ( $L$ ); o overhead  $O_{dist}$  inclui comunicação ( $C$ ), sincronização ( $S$ ), reconstrução ( $R$ ) e amostragem híbrida ( $H$ ). Assim, o DVS expressa o equilíbrio entre ganhos estruturais e custos do ambiente multi-QPU: valores positivos indicam cenários favoráveis à distribuição, e valores negativos, o contrário. Neste trabalho, adotamos como diretriz heurística os limiares  $DVS \geq 0,20$ (favorável),  $-0,20 < DVS < 0,20$ (marginal) e  $DVS \leq -0,20$ (desfavorável), passíveis de refinamento empírico. Na prática, os fatores são estimados por aproximações simples, o que permite transformar o framework conceitual em um critério explícito de decisão arquitetural.

### 3.2 Algoritmo para avaliação sensível à rede para D-VQA

O Algoritmo 1 ilustra os principais passos previstos pelo framework de avaliação sensível à rede, como proposto neste trabalho:

---

#### ALGORITHM 1 – AVALIAÇÃO SENSÍVEL À REDE PARA D-VQA.

---

**Entrada:** *circuito variacional*  $U(\theta)$ , *estratégia de particionamento*  $P$ , perfil de rede multi-QPU  $N$ , limiares heurísticos  $T^+$ ,  $T^-$

**Saída:** score de viabilidade distribuída  $DVS$ , regime  $R_s$

1.  $H \leftarrow \text{BuildHypergraph}(U(\theta))$
  2.  $\Pi \leftarrow \text{PartitionCircuit}(H, P)$
  3.  $(M, Q, D, L) \leftarrow \text{EstimateBenefitTerms}(U(\theta), H, \Pi)$
  4.  $(C, S, R, H_s) \leftarrow \text{EstimateOverheadTerms}(U(\theta), \Pi, N)$
  5.  $B_{dist} \leftarrow (M + Q + D + L)/4$
  6.  $O_{dist} \leftarrow (C + S + R + H_s)/4$
  7.  $DVS \leftarrow B_{dist} - O_{dist}$
  8. **if**  $DVS \geq T^+$  **then**
  9.  $R_s \leftarrow$  favorable
  10. **else if**  $DVS \leq T^-$  **then**
  11.  $R_s \leftarrow$  unfavorable
  12. **else**
  13.  $R_s \leftarrow$  marginal
  14. **end if**
  15. **return**  $(DVS, R_s)$
- 

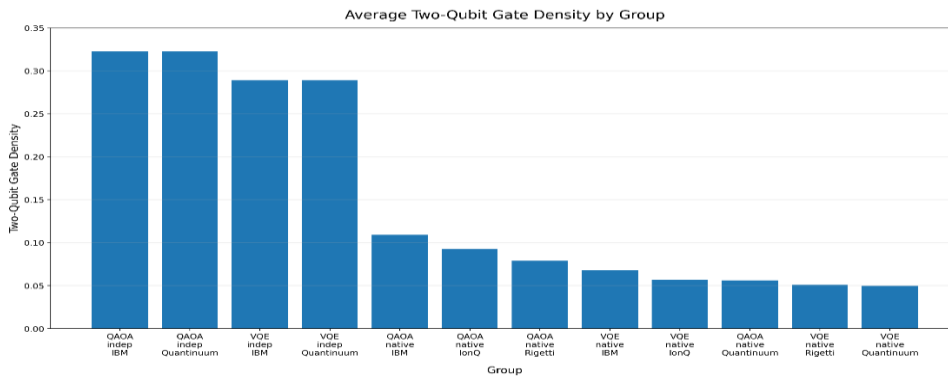
No Algoritmo 1,  $U(\theta)$  denota o circuito variacional analisado,  $P$  a estratégia de particionamento,  $N$  o perfil de rede multi-QPU,  $T^+$  e  $T^-$  os limiares heurísticos de decisão; como saída, o algoritmo retorna o score de viabilidade distribuída ( $DVS$ ) e o regime correspondente identificado  $R_s$ .

Como exemplo, suponha  $M = 0.80$ ,  $Q = 0.70$ ,  $D = 0.60$ ,  $L = 0.75$ ,  $C = 0.35$ ,  $S = 0.30$ ,  $R = 0.25$  e  $H = 0.40$ . Assim,  $B_{dist} = (M + Q + D + L)/4 = 0.7125$  e  $O_{dist} = (C + S + R + H)/4 = 0.3250$ , resultando em  $DVS = B_{dist} - O_{dist} = 0.3875$ . Nesse caso, o framework classifica o cenário como favorável, pois os ganhos esperados da distribuição superam seus overheads.

#### 4. Experimentos

Para validação, foram gerados benchmarks com a ferramenta MQTBench [QUETSCHLICH et al., 2023] para IBM, Rigetti, Quantinuum e IonQ, com 4, 8 e 12 qubits, portas nativas e independentes, e algoritmos VQE e QAOA em OpenQASM 2.0 sem otimização. Nesta versão, a análise baseia-se em métricas estruturais, estratégias de particionamento e estimação de custos distribuídos sob perfis de rede, sem execução física multi-QPU. Os circuitos benchmark foram publicados no IEEE DataPort [CAMBIUCCI, 2026], e os scripts estão disponíveis em repositório GitHub [HYPAQ, 2026].

A avaliação foi conduzida em três etapas: extração de métricas estruturais, aplicação de estratégias de particionamento e estimação dos componentes do DVS sob diferentes perfis de rede. Isso permitiu analisar como circuitos, plataformas e particionamentos afetam a classificação em regimes favorável, marginal ou desfavorável. Em QAOA, comparamos structure-only e mixer-aware; em VQE, structure-only e ansatz-aware, sob perfis de rede de baixo, médio e alto overhead.



**Figura 1. Análise estrutural de circuitos benchmark QAOA e VQE.**

A Figura 1 mostra a densidade média de portas de dois qubits por grupo de benchmark, considerando circuitos QAOA e VQE por backend e representação (independente ou nativa). Essa métrica indica a intensidade de interações multiqubit, influenciando o particionamento e o custo esperado de comunicação em cenários distribuídos. Observa-se maior densidade nos grupos QAOA indep em IBM e Quantinuum, seguidos por VQE indep nos mesmos backends, enquanto os circuitos nativos apresentam valores menores. Isso sugere que a viabilidade de D-VQA depende não apenas do número de qubits, mas também do padrão estrutural de acoplamento.

A Tabela 1 resume, para cada família VQA, a baseline estrutural, a estratégia funcional correspondente e o critério adicional de particionamento. Em ambos os casos, o objetivo é mostrar que abordagens sensíveis à localidade funcional podem preservar melhor propriedades relevantes do circuito variacional do que uma estratégia apenas estrutural.

**Tabela 1. Comparação entre baseline estrutural e estratégias funcionais para QAOA e VQE.**

Família VQA	Baseline	Estratégia funcional	Critério adicional	Efeito esperado
QAOA	structure-only	mixer-aware	preservação das dependências induzidas pelo mixer	maior L, menor risco de cortes funcionalmente críticos
VQE	structure-only	ansatz-aware	preservação de blocos variacionais e padrões locais de emaranhamento	maior L, melhor compromisso entre profundidade local e integridade variacional

Embora esta versão não inclua comparação experimental completa com **circuit cutting**, o DVS foi definido para apoiar essa análise de forma exploratória, especialmente em cenários nos quais os custos de reconstrução ( $R$ ) e amostragem híbrida ( $H$ ) crescem menos do que os de comunicação ( $C$ ) e sincronização ( $S$ ).

## 5. Conclusão

Este artigo investigou a viabilidade da execução distribuída de algoritmos variacionais quânticos em problemas de otimização, assumindo que a distribuição não deve ser tratada como mecanismo automático de escalabilidade. Os resultados indicam que a atratividade de D-VQA depende da interação entre estrutura do problema, localidade do ansatz e do mixer, qualidade do particionamento e custos do ambiente multi-QPU. Como principal contribuição, o trabalho propõe um framework sensível à rede, acompanhado de um score heurístico de viabilidade distribuída (DVS) e de uma validação exploratória inicial com benchmarks estruturais e perfis de rede simulados. O artigo não busca demonstrar uma vantagem prática universal da execução distribuída, mas oferecer um critério conceitual-operacional para analisar quando a distribuição tende a compensar. A evidência apresentada é inicial e indicativa. Como trabalhos futuros, pretende-se calibrar o DVS, realizar simulações multi-QPU mais realistas, compará-lo com estratégias alternativas, incluindo circuit cutting, e aprofundar a avaliação dos efeitos de ruído, latência e heterogeneidade de hardware.

## Referências

- BURT, Felix; CHEN, Kuan-Cheng; LEUNG, Kin K. A multilevel framework for partitioning quantum circuits. *Quantum*, v. 10, p. 1984, 2026.
- CAMBIUCCI, W. A Network-Sensitive Framework for Variational Quantum Optimization on Multi-QPU Architectures. *IEEE DataPort*, 2026. DOI: 10.21227/s9b5-qy94.
- GIOVAGNOLI, Alessandro. An Introduction to the Quantum Approximate Optimization Algorithm. *arXiv preprint arXiv:2511.18377*, 2025.
- HYP AQ, Distributed Viability Score - DVS. *GitHub*, 2026. Disponível em repositório público: <https://github.com/hypaq/dvs>. Acesso em: 20 de abril de 2026.
- KIM, Seongmin; SUH, In-Saeng. Distributed Variational Quantum Algorithm with Many-qubit for Optimization Challenges. *arXiv preprint arXiv:2503.00221*, 2025.
- NOVÁK, Vojtěch; ZELINKA, Ivan; SNÁŠEL, Václav. Optimization Strategies for Variational Quantum Algorithms in Noisy Landscapes. *arXiv preprint arXiv:2506.01715*, 2025.
- QUETSCHLICH, Nils; et al. MQT Bench: Benchmarking Software and Design Automation Tools for Quantum Computing. *Quantum*, v. 7, p. 1062, 2023.
- STĘCHLY, Michał. Introduction to Variational Quantum Algorithms. *arXiv preprint arXiv:2402.15879*, 2024.