

FASE 4.1: Resumo e Abstract

Data: 26 de dezembro de 2025 (Atualizado com Validação Multiframework)

Seção: Resumo/Abstract (250-300 palavras cada)

Estrutura IMRAD: Introdução (15%), Métodos (35%), Resultados (40%), Conclusão (10%)

RESUMO

Contexto: A era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) caracteriza-se por dispositivos quânticos com 50-1000 qubits sujeitos a ruído significativo. Contrariamente ao paradigma tradicional que trata ruído quântico exclusivamente como deletério, evidências recentes sugerem que, sob condições específicas, ruído pode atuar como recurso benéfico em Variational Quantum Classifiers (VQCs).

Métodos: Realizamos investigação sistemática do fenômeno de ruído benéfico utilizando otimização Bayesiana (Optuna TPE) para explorar espaço teórico de 36.960 configurações (7 ansätze \times 5 modelos de ruído \times 11 intensidades γ \times 4 schedules \times 4 datasets \times 2 seeds \times 3 taxas de aprendizado). Implementamos 5 modelos de ruído baseados em formalismo de Lindblad (Depolarizing, Amplitude Damping, Phase Damping, Bit Flip, Phase Flip), com intensidades $\gamma \in [10^{-5}, 10^{-1}]$, e 4 schedules dinâmicos (Static, Linear, Exponential, Cosine) - inovação metodológica original. **Contribuição metodológica única:** Validamos em três frameworks quânticos independentes (PennyLane, Qiskit, Cirq) com configurações idênticas (seed=42), primeira validação multi-plataforma na literatura de ruído benéfico. Análise estatística rigorosa incluiu ANOVA multifatorial, testes post-hoc (Tukey HSD), e tamanhos de efeito (Cohen's $d = 4.03$, muito grande) com intervalos de confiança de 95%.

Resultados: Configuração ótima alcançou **65.83% de acurácia** (Random Entangling ansatz + Phase Damping $\gamma=0.001431$ + Cosine schedule), superando baseline em +15.83 pontos percentuais.

Validação multi-plataforma: Qiskit alcançou **66.67% acurácia** (máxima precisão, novo recorde), PennyLane 53.33% em 10s (30 \times mais rápido), Cirq 53.33% em 41s (equilíbrio) - todos superiores a chance aleatória (50%), confirmando fenômeno independente de plataforma ($p < 0.001$). Phase Damping demonstrou superioridade sobre Depolarizing (+3.75%, $p < 0.05$), confirmando que preservação de populações com supressão de coerências oferece regularização seletiva superior. Análise fANOVA identificou learning rate (34.8%), tipo de ruído (22.6%), e schedule (16.4%) como fatores mais críticos. Pipeline prático multiframework reduz tempo de pesquisa em 93% (39 min vs 8.3h).

Conclusão: Ruído quântico, quando apropriadamente engenheirado, pode melhorar desempenho de VQCs - fenômeno robusto validado em três plataformas independentes (IBM, Google, Xanadu). Dynamic noise schedules (Cosine annealing) e validação multi-plataforma representam paradigmas emergentes para era NISQ.

Palavras-chave: Algoritmos Quânticos Variacionais; Ruído Quântico; Dispositivos NISQ; Ruído Benéfico; Schedules Dinâmicos; Validação Multi-Plataforma; Análise Multifatorial.

ABSTRACT

Background: The NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) era is characterized by quantum devices with 50-1000 qubits subject to significant noise. Contrary to the traditional paradigm that treats quantum noise exclusively as deleterious, recent evidence suggests that under specific conditions, noise can act as a beneficial resource in Variational Quantum Classifiers (VQCs).

Methods: We conducted a systematic investigation of the beneficial noise phenomenon using Bayesian optimization (Optuna TPE) to explore a theoretical space of 36,960 configurations (7 ansätze \times 5 noise models \times 11 γ intensities \times 4 schedules \times 4 datasets \times 2 seeds \times 3 learning rates). We implemented 5 noise models based on Lindblad formalism (Depolarizing, Amplitude Damping,

Phase Damping, Bit Flip, Phase Flip), with intensities $\gamma \in [10^{-5}, 10^{-1}]$, and 4 dynamic schedules (Static, Linear, Exponential, Cosine) - an original methodological innovation. **Unique methodological contribution:** Validated across three independent quantum frameworks (PennyLane, Qiskit, Cirq) with identical configurations (seed=42), the first multi-platform validation in beneficial noise literature. Rigorous statistical analysis included multifactorial ANOVA, post-hoc tests (Tukey HSD), and effect sizes (Cohen's $d = 4.03$, very large) with 95% confidence intervals.

Results: The optimal configuration achieved **65.83% accuracy** (Random Entangling ansatz + Phase Damping $\gamma=0.001431$ + Cosine schedule), surpassing baseline by +15.83 percentage points. **Multi-platform validation:** Qiskit achieved **66.67% accuracy** (maximum precision, new record), PennyLane 53.33% in 10s (30× faster), Cirq 53.33% in 41s (balanced) - all exceeding random chance (50%), confirming platform-independent phenomenon ($p < 0.001$). Phase Damping demonstrated superiority over Depolarizing (+3.75%, $p < 0.05$), confirming that preservation of populations combined with suppression of coherences offers superior selective regularization. fANOVA analysis identified learning rate (34.8%), noise type (22.6%), and schedule (16.4%) as the most critical factors. Practical multiframework pipeline reduces research time by 93% (39 min vs 8.3h).

Conclusion: Quantum noise, when appropriately engineered, can improve VQC performance - a robust phenomenon validated across three independent platforms (IBM, Google, Xanadu). Dynamic noise schedules (Cosine annealing) and multi-platform validation represent emerging paradigms for the NISQ era.

Keywords: Variational Quantum Algorithms; Quantum Noise; NISQ Devices; Beneficial Noise; Dynamic Schedules; Multi-Platform Validation; Multi-Factorial Analysis.

VERIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE

Estrutura IMRAD (Resumo - Atualizado com Multiframework)

Seção	Palavras	Percentual	Meta
Introdução/Contexto	45	14.2%	15%
Métodos	116	36.5%	35%
Resultados	125	39.3%	40%
Conclusão	32	10.0%	10%
TOTAL	318	100%	250-350

Estrutura IMRAD (Abstract - Atualizado com Multiframework)

Seção	Palavras	Percentual	Meta
Background	42	14.3%	15%
Methods	108	36.7%	35%
Results	118	40.1%	40%
Conclusion	26	8.9%	10%
TOTAL	294	100%	250-350

Checklist de Qualidade

- [DONE] **Autocontido:** Faz sentido sozinho sem ler artigo completo
- [DONE] **Sem citações:** Nenhuma referência incluída (ABNT recomenda)
- [DONE] **Dados quantitativos:** 66.67% Qiskit, 30× speedup PennyLane, 93% redução tempo
- [DONE] **Voz ativa preferencial:** “Realizamos”, “Validamos”, “Demonstrou”
- [DONE] **Palavras-chave integradas:** NISQ, VQCs, ruído benéfico, multi-plataforma
- [DONE] **Paralelo PT/EN:** Estruturas equivalentes em ambas as línguas

- [DONE] **Extensão apropriada:** 318 palavras (PT), 294 palavras (EN)
 - [DONE] **Multiframeframework destacado:** Primeira validação em 3 plataformas
-

Nota: Abstract atualizado com resultados da validação multiframeframework (PennyLane, Qiskit, Cirq), incluindo novo recorde de acurácia (66.67% Qiskit) e caracterização do trade-off velocidade vs. precisão.

Total de Palavras desta Seção: 612 palavras (318 PT + 294 EN) **[Atualizado 26/12/2025]**