

## DA ELETRÔNICA DIGITAL À COMPUTAÇÃO QUÂNTICA: COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO EM PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

Vinícius Rodrigues dos Santos<sup>1</sup>

Julio Cesar Carou Felix de Lima<sup>2</sup>

Olinda Nogueira Paes Rizzo<sup>3</sup>

### Resumo

### Introdução

A evolução da tecnologia da informação está diretamente associada à busca por maior capacidade de processamento e eficiência na resolução de problemas computacionais complexos. A computação clássica, baseada em bits e portas lógicas digitais, consolidou-se como a base do desenvolvimento tecnológico moderno, permitindo avanços em diversas áreas, desde a automação industrial até sistemas de inteligência artificial. No entanto, determinados problemas, como busca em grandes bases de dados e otimizações combinatórias, apresentam crescimento exponencial da complexidade, o que torna as soluções tradicionais ineficientes ou até mesmo inviáveis em escalas elevadas. Nesse contexto, a computação quântica surge como uma alternativa promissora, fundamentada em princípios da mecânica quântica, como superposição e entrelaçamento. Diferentemente da eletrônica digital, em que cada bit assume apenas os estados 0 ou 1, o qubit pode representar simultaneamente múltiplos estados, abrindo caminho para novos paradigmas de processamento. Dentre os algoritmos propostos, o de Grover destaca-se por oferecer aceleração significativa em tarefas de busca, reduzindo a complexidade de  $O(N)$ , típica da computação clássica, para  $O(\sqrt{N})$ . Dada a complexidade do tema, este trabalho tem caráter introdutório e didático,

voltado a profissionais e estudantes de engenharia da computação. A proposta é comparar de forma prática a computação tradicional e a computação quântica, utilizando como base a simulação de um problema de otimização em ambiente controlado, relacionando os conceitos teóricos com uma implementação em planilha eletrônica. Assim, ao comparar paradigmas distintos, o trabalho reforça o potencial de complementaridade entre a computação clássica e a quântica.

### Objetivos

#### Objetivo Geral

Comparar os fundamentos e a aplicação prática da computação clássica e da computação quântica, evidenciando as diferenças de desempenho na resolução de problemas de busca e otimização.

#### Objetivos Específicos

- Descrever os fundamentos da computação clássica, com ênfase na eletrônica digital como base para o processamento de informações.
- Apresentar os conceitos essenciais da computação quântica, com destaque para os qubits, superposição e o algoritmo de Grover.

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia de Computação da Universidade Santo Amaro, SP. E-mail: viniciusrodriguesdossantos@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Professor Mestre, Universidade Santo Amaro - SP – jclima@prof.unisa.br

<sup>3</sup> Professora Mestra, Universidade Santo Amaro, SP. E-mail: orizzo@prof.unisa.br.

- Elaborar uma simulação em planilha eletrônica, modelando um problema de seleção de máquinas para atender uma demanda de produção com o menor consumo de energia.
- Comparar os resultados obtidos pela abordagem clássica (busca exaustiva/Solver) e pela abordagem quântica (Grover), destacando vantagens e limitações de cada paradigma. 4
- Discutir os resultados de forma didática, utilizando analogias com a eletrônica digital sempre que apropriado.

## Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é de caráter exploratório e comparativo, combinando pesquisa bibliográfica e ensaio prático em ambiente computacional.

## Pesquisa Bibliográfica

Foi realizada uma revisão de literatura em artigos científicos, dissertações e teses disponíveis em bases de dados acadêmicas, tais como IEEE Xplore, ACM Digital Library e Pub-Med Central. A revisão buscou fundamentar os conceitos de computação clássica e computação quântica, abordando aspectos teóricos como:

- Representação da informação por meio de bits na computação clássica e de qubits na computação quântica.
  - Complexidade de algoritmos clássicos ( $O(N)$ ) em comparação com algoritmos quânticos ( $O(\sqrt{N})$ ).
  - O papel da eletrônica digital como base de comparação, dada sua ampla disseminação e clareza conceitual.
  - O algoritmo de Grover como estudo de caso para otimização de buscas.
- Essa etapa permitiu construir a base conceitual necessária para estabelecer comparações consistentes entre os dois paradigmas.

## Simulação Computacional

Como ensaio prático, foi elaborada uma simulação em planilha eletrônica (Microsoft Excel), contemplando:

- Definição do problema: uma fábrica com 10 máquinas, cada uma com diferentes capacidades de produção e consumo de energia, tabela 1.

**Tabela 1 - Dados dos recursos maquinários, potências e custos.**

ID	Capacidade (unid/h)	Potencia (kW)	Custo (R\$/h)
M1	20	2,5	120
M2	35	4	180
M3	50	7,2	260
M4	28	3,1	140
M5	42	5,5	190
M6	60	8	300
M7	18	2,2	110
M8	55	7,5	270
M9	33	4,8	200
M10	47	6,3	230

- Objetivo da otimização: selecionar o conjunto de máquinas que satisfaça uma demanda de produção pré-definida, com o menor custo e consumo de energia.
  - Abordagem clássica: a planilha avalia todas as possíveis combinações ( $2^{10} = 1024$ ) de máquinas, identificando a solução ótima por busca exaustiva (equivalente ao Solver).
  - Abordagem quântica: foi implementada uma simulação do algoritmo de Grover, utilizando as colunas auxiliares da aba Grover para calcular amplitudes ( $a_0, a_1, a_2, \text{etc.}$ ), probabilidades normalizadas ( $p_{\text{norm}}$ ) e o acúmulo de probabilidades ( $p_{\text{cumsum}}$ ).
- A metodologia permitiu comparar, em condições equivalentes, o comportamento da busca clássica e a amplificação de probabilidades promovida pelo algoritmo de Grover, demonstrando de forma didática a vantagem quântica no tratamento de problemas de busca e otimização.

## Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nas simulações demonstraram que tanto o Solver quanto o algoritmo de Grover foram capazes de identificar combinações de máquinas que atendiam às restrições de produção com menor custo e consumo energético. Contudo, a análise mais detalhada revela diferenças fundamentais entre os dois métodos. O Solver clássico atua de maneira determinística, explorando o espaço de soluções por meio de iterações sucessivas e resolução de subproblemas internos. Essa abordagem é eficiente em instâncias de pequena escala, mas apresenta crescimento exponencial da carga computacional conforme o número de variáveis aumenta (Cormen et al., 2009). Isso foi evidenciado nos experimentos, nos quais algumas simulações exigiram dezenas de iterações e a resolução de mais de cem subproblemas antes de convergir para a solução ótima. Por outro lado, a simulação do algoritmo de Grover apresentou um comportamento consistente e previsível, com número de interações fixo em aproximadamente 25, independentemente da demanda. Esse padrão reflete a formulação matemática do algoritmo, cuja complexidade é da ordem de  $O(\sqrt{N})$ , em contraste com o  $O(N)$  da busca clássica (Grover, 1996; Szabłowski, 2021). Essa característica torna o Grover especialmente vantajoso em problemas de otimização combinatória, onde o número de combinações cresce exponencialmente. Outro aspecto importante é a natureza determinística do Solver versus a probabilística da computação quântica. Enquanto o Solver garante a solução ótima após um número variável de passos, o Grover concentra progressivamente a probabilidade sobre os estados viáveis, de modo que a medição final revela a solução correta com alta probabilidade (Nielsen; Chuang, 2000; Steane, 1998). Essa diferença metodológica destaca a lógica distinta entre os dois paradigmas: o clássico percorre o espaço de busca, enquanto o quântico manipula amplitudes de probabilidade para amplificar soluções corretas e anular incorretas. Apesar das simplificações adotadas, como a implementação em planilha eletrônica, os resultados reforçam o valor didático

da simulação. O Excel não implementa de fato operações quânticas, mas apenas modela as etapas conceituais do Grover. Ainda assim, essa analogia é válida para compreender a lógica distinta do paradigma quântico e visualizar, em um ambiente acessível, como ocorre a concentração de probabilidades em torno das soluções viáveis. Essa diferença torna-se ainda mais relevante quando se consideram problemas de maior porte. Em cenários industriais reais, como o planejamento da produção em linhas de manufatura, a logística de transportes ou a alocação de recursos energéticos, a quantidade de combinações possíveis cresce de forma exponencial. Nessas situações, métodos clássicos frequentemente se tornam inviáveis devido ao tempo computacional exigido. A aceleração quadrática proporcionada por Grover, embora não exponencial como o algoritmo de Shor (SHOR, 1994), já representa um ganho significativo. Em síntese, o estudo evidencia que a computação clássica e a quântica não são excludentes, mas complementares. A primeira continuará sendo essencial para a maioria das aplicações, enquanto a segunda desponta como solução estratégica para problemas complexos de busca e otimização. Dessa forma, o presente trabalho contribui para o entendimento inicial dessa complementaridade e abre espaço para futuras investigações em ambientes computacionais mais robustos.

## Considerações Finais

O presente trabalho apresentou uma análise comparativa entre a computação clássica e a computação quântica, utilizando como estudo de caso um problema de otimização na seleção de máquinas para atender demandas de produção com restrições de custo e energia. Através da simulação em planilha eletrônica, foi possível ilustrar, de forma didática, as diferenças fundamentais entre o Solver clássico e o algoritmo de Grover. Os resultados evidenciaram que, em problemas de pequena escala, ambas as abordagens convergem para soluções equivalentes, atendendo integralmente às restrições impostas. Entretanto, a análise

demonstrou que o Solver depende de múltiplas iterações e resolução de subproblemas para alcançar a solução ótima, enquanto o Grover apresenta desempenho consistente, com número de interações proporcional à raiz quadrada do espaço de busca. Essa característica destaca a vantagem estratégica da computação quântica em problemas de busca e otimização, nos quais o crescimento exponencial do número de combinações torna inviáveis os métodos clássicos. Ainda que a implementação realizada em planilha não represente operações quânticas reais, a simulação reforça o potencial pedagógico do modelo e facilita a compreensão da lógica distinta do paradigma quântico. Portanto, conclui-se que a computação clássica e a computação quântica não devem ser vistas como tecnologias concorrentes, mas complementares. A clássica permanecerá como base para a maioria das aplicações, enquanto a quântica desponta como solução promissora para cenários complexos que desafiam os métodos convencionais. O estudo aqui desenvolvido contribui para o entendimento dessa complementaridade e aponta perspectivas para pesquisas futuras em ambientes computacionais mais robustos, capazes de implementar algoritmos quânticos em escala real. Dessa forma, o estudo reforça não apenas a importância pedagógica da simulação, mas também abre caminhos para futuros trabalhos que explorem implementações reais em hardware quântico.

## Palavras-chave

Algoritmo de Grover; Computação clássica; Computação quântica; Otimização.

## Referências

CORMEN, T. H. et al. Algoritmos: teoria e prática. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. FAYYAD, U. et al. From data mining to knowledge discovery in databases. *Communications of the ACM*, v. 39, n. 11, p. 24–26, 1996.

GROVER, L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC)*. New York: ACM, 1996. p. 212–219. Disponível em: <https://dlnext.acm.org/doi/10.1145/237814.237866>, Acesso em 06 out. 2025.

NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. PRESS, W. H. *Quantum computing: promises and realities*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 96, n. 25, p. 14197–14199, 1999.

SHOR, P. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. In: *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. IEEE, 1994. p. 124–134.

STEANE, A. Quantum computing. *Reports on Progress in Physics*, v. 61, n. 2, p. 117–173, 1998.

SZABŁOWSKI, P. J. Understanding mathematics of Grover's algorithm. *Quantum Information Processing*, v. 20, n. 5, p. 1–34, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11128-021-03125-w>, Acesso em 06 out. 2025. STALLINGS, W. *Computer Organization and Architecture: Designing for Performance*. 10th ed. Pearson, 2018.

RESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. 3rd ed. Cambridge University Press, 2007.