

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

Vinícius Rodrigues dos Santos¹

Julio Cesar Carou Felix de Lima²

Olinda Nogueira Paes Rizzo³

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 inefficientes 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 entrelacamento. 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. Dentro 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 didáti-

co, 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.

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

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

³Professora 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.
- 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 PubMed 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, \dots), probabilidades normalizadas (p_{norm}) e o acúmulo de probabilidades (p_{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; Szabolowski, 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 ampliar 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://dl.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.