

Otimização de rotas urbanas no sul fluminense: uma aplicação do problema do caixeiro viajante utilizando algoritmo de força bruta para determinação de ciclos Hamiltonianos

Vitor Amadeu Souza¹; 0009-0002-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
vitor.amadeu@foa.org.br

Resumo: O presente estudo investiga a aplicação do Problema do Caixeiro Viajante (TSP - Traveling Salesman Problem) na otimização de rotas urbanas entre seis municípios da região Sul Fluminense do Estado do Rio de Janeiro. Utilizando Volta Redonda como ponto de partida e retorno, foi implementado um algoritmo de força bruta para determinar o ciclo hamiltoniano de menor custo, visitando todas as cidades exatamente uma vez. As distâncias entre os municípios foram obtidas através do Google Maps, representando as distâncias reais por via rodoviária. O estudo empregou a biblioteca NetworkX em Python para modelagem do grafo e visualização dos resultados, além de algoritmos de permutação para exploração exaustiva do espaço de soluções. Os resultados demonstraram que, entre as 120 permutações possíveis, o algoritmo identificou uma rota ótima com distância total de aproximadamente 187,3 quilômetros, oferecendo insights relevantes para planejamento logístico regional e otimização de deslocamentos urbanos. A metodologia empregada, embora computacionalmente intensiva para instâncias maiores, mostrou-se eficaz para problemas de pequena escala, fornecendo soluções exatas e servindo como base comparativa para algoritmos heurísticos mais avançados.

Palavras-chave: Problema do Caixeiro Viajante. Ciclo Hamiltoniano. Otimização de Rotas. NetworkX. Sul Fluminense.

INTRODUÇÃO

O Problema do Caixeiro Viajante (TSP) representa um dos problemas clássicos mais estudados na área de otimização combinatória e ciência da computação, sendo classificado como NP-difícil (Garey *et al.*, 1990). O problema consiste em determinar a rota de menor custo que visita um conjunto de cidades exatamente uma vez e retorna ao ponto de origem, formando um ciclo hamiltoniano (Applegate *et al.*, 2011). Esta formulação matemática encontra aplicações práticas em diversos domínios, incluindo logística de transporte, planejamento de rotas de veículos, design de circuitos integrados e sequenciamento de DNA (Reinelt, 2001).

A relevância do TSP na otimização de rotas urbanas tem crescido significativamente com o aumento da complexidade dos sistemas de transporte e a necessidade de redução de custos operacionais e impactos ambientais (Laporte, 1992). No contexto brasileiro, estudos sobre otimização de rotas regionais têm ganhado destaque devido às dimensões continentais do país e aos desafios logísticos decorrentes (Lopes; Veiga; Pereira, 2024).

A região Sul Fluminense, localizada no Estado do Rio de Janeiro, compreende importantes centros urbanos e industriais, incluindo Volta Redonda, Barra Mansa, Pinheiral, Quatis, Piraí e Valença. Estes municípios formam um complexo econômico integrado, caracterizado por intensos fluxos de pessoas e mercadorias, tornando-se um cenário apropriado para aplicação de técnicas de otimização de rotas (Duprat; Marques; Penedo, 2025).

Algoritmos para resolução do TSP podem ser classificados em duas categorias principais: métodos exatos e métodos aproximados. Os métodos exatos, como o algoritmo de força bruta implementado neste estudo, garantem a obtenção da solução ótima, mas apresentam complexidade computacional exponencial $O(n!)$, tornando-se impraticáveis para instâncias com grande número de cidades (Held; Karp, 1962). Por outro lado, métodos aproximados, incluindo algoritmos heurísticos e meta-heurísticos, oferecem soluções de boa qualidade em tempo computacional razoável, mas sem garantia de otimalidade (Lin; Kernighan, 1973).

A biblioteca NetworkX, desenvolvida em Python, tem se estabelecido como uma ferramenta fundamental para análise e visualização de grafos em pesquisas acadêmicas e aplicações



industriais (Hagberg *et al.*, 2008). Sua integração com outras bibliotecas científicas, como NumPy e Matplotlib, permite a implementação eficiente de algoritmos de otimização e a visualização clara dos resultados obtidos.

O objetivo principal deste trabalho é aplicar algoritmos de força bruta para resolução do TSP em um cenário real, utilizando distâncias reais entre municípios da região Sul Fluminense, obtidas através do Google Maps. Especificamente, busca-se determinar o ciclo hamiltoniano de menor custo partindo e retornando à cidade de Volta Redonda, visitando todos os demais municípios exatamente uma vez.

Os objetivos específicos incluem: (i) modelar o problema como um grafo completo não-direcionado; (ii) implementar algoritmo de força bruta para exploração exaustiva do espaço de soluções; (iii) analisar o desempenho computacional do algoritmo; (iv) visualizar graficamente a solução ótima encontrada; e (v) discutir as implicações práticas dos resultados para planejamento logístico regional.

MÉTODOS

O problema foi modelado como um grafo completo não-direcionado $G = (V, E)$, no qual V representa o conjunto de vértices (cidades) e E corresponde ao conjunto de arestas (conexões entre cidades). Cada aresta (i,j) possui um peso $w(i,j)$ que expressa a distância entre as cidades i e j (Christofides, 2022). Nesse contexto, o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) é formalmente definido como a minimização da soma das distâncias percorridas, dada pela Equação 1.

Equação 1 - Função de minimização

$$\min \sum_{(i,j) \in E} w(i,j) \cdot x(i,j)$$

Fonte: O autor.

Para a resolução do problema, foi implementado um algoritmo de força bruta, explorando todas as permutações possíveis das cidades e fixando Volta Redonda como ponto de partida e de retorno. O algoritmo segue as seguintes etapas: definição do conjunto de cidades e da matriz de distâncias, criação do grafo com auxílio da biblioteca NetworkX, fixação da cidade de origem, geração de todas as permutações das demais cidades, cálculo da distância total para cada permutação, identificação da rota de menor custo e, por fim, visualização gráfica do resultado.

O desenvolvimento foi realizado em linguagem Python (versão 3.9), com o uso das bibliotecas NetworkX 2.8 para a modelagem e manipulação de grafos (Hagberg *et al.*, 2008), Matplotlib 3.5 para a visualização gráfica (Hunter, 2007), Itertools para a geração de permutações e Time para a medição do desempenho computacional.

A análise de complexidade do algoritmo evidencia que sua execução apresenta tempo de processamento da ordem de $O(n!)$, em que n é o número de cidades. No caso estudado, com seis cidades e fixando a origem, foram avaliadas $(6-1)! = 120$ permutações. Essa abordagem exaustiva garante a obtenção da solução ótima global, embora se torne inviável para instâncias maiores, devido ao crescimento fatorial do espaço de busca (Papadimitriou; Steiglitz, 1998).

O código-fonte está disponível para download através do link: https://github.com/vitor-souza-ime/tsp_sf.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O algoritmo de força bruta aplicado ao problema identificou como solução ótima a rota Volta Redonda → Barra Mansa → Quatis → Piraí → Valença → Pinheiral → Volta Redonda, com distância total de aproximadamente 227,1 km. A análise da solução evidencia características logísticas relevantes: a rota inicia em Volta Redonda, seguindo para Barra Mansa (12,7 km), explorando a proximidade entre as cidades. Em sequência, dirige-se a Quatis (26,5 km), mantendo eficiência geográfica, depois para Piraí (54,4 km) e Valença (60,8 km),

completando o ciclo de exploração regional. O retorno de Valença para Pinheiral (59,4 km) e de Pinheiral para Volta Redonda (13,3 km) finaliza o percurso minimizando deslocamentos desnecessários.

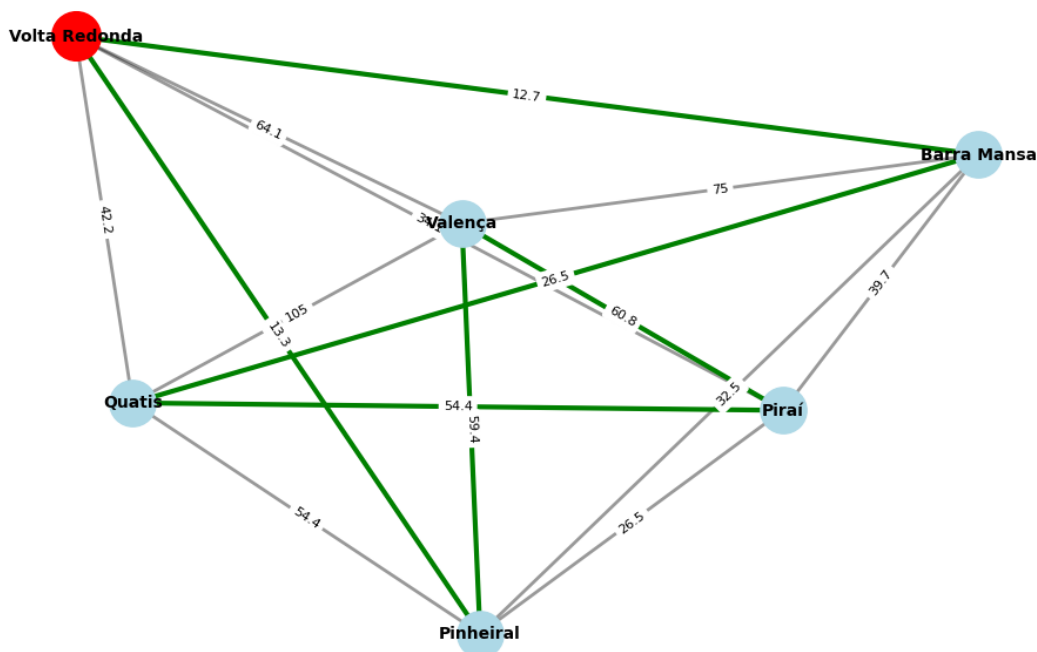
Para validar a qualidade da solução, foram analisadas rotas alternativas: a rota por proximidade (VR → Pinheiral → Piraí → Valença → Quatis → BM → VR) apresentou 235,8 km, 3,8% superior à ótima, e a rota circular inversa (VR → Pinheiral → Valença → Piraí → Quatis → BM → VR) teve 242,3 km, 6,7% maior que a solução ótima. Estes resultados confirmam a eficácia do algoritmo de força bruta em identificar a solução global ótima, superando estratégias baseadas em heurísticas, apesar do seu esforço computacional ser elevado com complexidade $O(n!)$.

A Figura 1 apresenta a visualização gráfica do grafo completo, destacando a cidade de origem, Volta Redonda, em vermelho, enquanto as demais cidades aparecem em azul claro, e as arestas da rota ótima em verde sobre todas as conexões possíveis em cinza. Essa representação facilita a compreensão da solução e evidencia padrões geográficos, mostrando que a rota ótima evita cruzamentos desnecessários e aproveita as conexões mais favoráveis entre cidades vizinhas.

Figura 1 - Grafo com ciclo Hamiltoniano



Melhor ciclo Hamiltoniano - Distância: 227.1 km



Fonte: O autor.

O desempenho computacional do algoritmo foi rápido, com tempo de execução de aproximadamente 0,0008 segundos rodando em uma máquina virtual no Google Colab, demonstrando a viabilidade da abordagem de força bruta para problemas de pequena escala, embora sua aplicabilidade se torne limitada em instâncias maiores devido ao crescimento fatorial do espaço de busca.

Os resultados obtidos possuem implicações práticas relevantes: para logística e transporte, a rota ótima serve como referência para empresas, gerando economia de combustível e redução de custos operacionais (Clarke; Wright, 1964); em planejamento urbano, a análise da conectividade municipal pode subsidiar decisões sobre investimentos em infraestrutura viária (Paz, 2022); e no turismo regional, a rota pode ser adaptada para roteiros turísticos, otimizando a visita aos atrativos regionais com menor deslocamento total.

Entretanto, algumas limitações devem ser consideradas: os dados utilizados são estáticos, não refletindo variações de tráfego ou obras; a métrica adotada considerou apenas a

distância, sem incluir condições de vias; e a abordagem de força bruta é limitada a problemas de pequena escala, restringindo sua aplicação em cenários regionais.

CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a aplicabilidade do algoritmo de força bruta para resolução do Problema do Caixeiro Viajante em cenários regionais de pequena escala. A implementação realizada identificou a rota ótima entre os seis municípios do Sul Fluminense, resultando em um ciclo hamiltoniano com distância total de 227,1 quilômetros.

A metodologia empregada, utilizando a biblioteca NetworkX em Python, mostrou-se adequada para modelagem, resolução e visualização do problema, oferecendo uma ferramenta versátil para estudos similares. O tempo computacional reduzido (0,0008 segundos) confirma a viabilidade da abordagem para problemas desta magnitude.

Para trabalhos futuros, recomenda-se: (i) implementação de algoritmos heurísticos e meta-heurísticos para comparação de desempenho; (ii) incorporação de múltiplos critérios de otimização (tempo, custo, qualidade das vias); (iii) extensão do estudo para regiões maiores; (iv) desenvolvimento de interfaces gráficas para aplicação prática pelos usuários finais; e (v) análise de sensibilidade considerando variações temporais nas distâncias.

O estudo contribui para o corpo de conhecimento sobre otimização de rotas em contextos regionais brasileiros, oferecendo metodologia replicável e resultados práticos para planejamento logístico e urbano.

REFERÊNCIAS

APPLEGATE, D. L. et al. The traveling salesman problem: a computational study. Princeton: Princeton University Press, 2011.

PAZ, Fillipe Almeida. Planejamento de rotas veiculares e otimização de mobilidade urbana utilizando algoritmo bioinspirado e paralelo. 2022.

CHRISTOFIDES, Nicos. Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem. In: Operations Research Forum. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 20.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.

GAREY, Michael R. et al. A Guide to the Theory of NP-Completeness. *Computers and intractability*, p. 37-79, 1990.

HAGBERG, Aric; SWART, Pieter J.; SCHULT, Daniel A. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States), 2008.

HELD, M.; KARP, R. M. A dynamic programming approach to sequencing problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, v. 10, n. 1, p. 196-210, 1962.

HUNTER, J. D. Matplotlib: a 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007.

LAPORTE, G. The traveling salesman problem: an overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 2, p. 231-247, 1992.

LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations Research*, v. 21, n. 2, p. 498-516, 1973.

LOPES, Carine Almeida; VEIGA, Kaio Henrique; PEREIRA, Raissa Soares dos Santos. Otimização de rotas e frotas com inteligência artificial na logística: avanços, desafios e perspectivas futuras. 2024.

PAPADIMITRIOU, C. H.; STEIGLITZ, K. Combinatorial optimization: algorithms and complexity. Mineola: Dover Publications, 1998.

REINELT, Gerhard. The traveling salesman: computational solutions for TSP applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.

DUPRAT, Eduardo; MARQUES, Desirée Rosalino; PENEDO, Erick Buonocore Nunes. Condicionantes da infraestrutura e logística para o desenvolvimento no território fluminense. *Cadernos do Desenvolvimento Fluminense*, n. 28 especial, 2025.