

Projeto de rota de ônibus em Boa Vista com Caixeiro Viajante multi-objetivo

Giovanna Mendes Garbácio, Vitor Jordão Carneiro Briglia

Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Roraima

Boa Vista, Brasil

gio.garbacio@gmail.com

vitorjordao8762@gmail.com

Abstract— The Traveling Salesman Problem aims to find the shortest route to visit a set of cities and return to the starting point, visiting each city only once. This NP-complete problem becomes increasingly difficult as the number of cities grows, leading to exponential route possibilities. Heuristic methods like Simulated Annealing are often used to find near-optimal solutions. This work implements an approximate algorithm for a multi-objective TSP, modeling a bus route in Boa Vista, Roraima. The goal is to maximize the number of passengers and minimize travel time, using distance and bus stop frequency as key parameters. While Simulated Annealing provides efficient solutions, challenges include the large graph size and approximated passenger flow. Despite these, the method proves flexible and effective for optimizing bus routes.

I. INTRODUÇÃO

O Problema do Caixeiro Viajante (TSP) consiste em encontrar o menor caminho para visitar um conjunto de cidades, retornando ao ponto de partida após percorrer todas elas apenas uma vez. Apesar de sua formulação simples, o TSP é um problema de otimização complexo, classificado como NP-completo, o que significa que não há uma solução eficiente em tempo polinomial ¹. Ele possui um vasto espaço de busca, tornando o problema desafiador, especialmente quando o número de cidades aumenta, gerando um número exponencial de possíveis rotas a serem consideradas. Devido a isso, o TSP é amplamente estudado na ciência da computação e possui várias aplicações práticas, como roteamento de veículos, fabricação de microchips, roteamento de pacotes em redes GSM e perfuração de placas de circuito.

A complexidade computacional do TSP é $O(n^2)$, sendo n o número de arestas ². Para lidar com essa complexidade, várias técnicas heurísticas têm sido utilizadas para encontrar soluções eficientes, como busca tabu, Simulated Annealing (SA) ³, métodos gulosos, algoritmos de formigas, recozimento simulado, e algoritmos genéticos. Embora essas técnicas não garantam a solução ótima, elas conseguem encontrar soluções próximas ao ótimo para instâncias com milhares de cidades.

O objetivo deste trabalho é implementar um algoritmo aproximado para resolver o problema do caixeiro viajante

multi-objetivo, modelando uma rota de ônibus na cidade de Boa Vista-RR. A proposta busca maximizar o número de passageiros transportados e minimizar o tempo total da rota. Para avaliar o tempo total, utilizamos a distância percorrida pelo ônibus, e para estimar a quantidade de passageiros, consideramos a frequência com que os ônibus passam em paradas situadas em rotas reais, próximas aos destinos escolhidos: o Parque Municipal Germano Augusto Sampaio, no bairro Pintolândia, e o Roraima Garden Shopping, no bairro Caçari.

A análise dos resultados foi baseada na eficiência computacional e na qualidade das soluções geradas, considerando o equilíbrio entre a minimização das distâncias percorridas e a maximização do número de passageiros atendidos. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais direta do algoritmo no contexto específico do problema, embora sem comparações com instâncias de referência.

II. DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

Nessa seção detalharemos a fase da criação do grafo que representa a cidade de Boa Vista - RR, e a incorporação dos parâmetros de distância e quantidade de pessoas.

A. Criação do grafo

Utilizamos a biblioteca do OpenStreetMap ⁴ para criar um grafo representando a rede viária de Boa Vista-RR com um raio de 8000 metros ao redor da Av. Cap. Ene Garcês (próximo à rotatória do Centro Cívico). Essa biblioteca fornece a distância entre as arestas que unem cada vértice. Para limitar a área de interesse, foram definidos cortes geográficos específicos, excluindo áreas além da Ponte dos Macuxis e da Ponte do Cauamé. A imagem abaixo ilustra a estrutura do grafo.

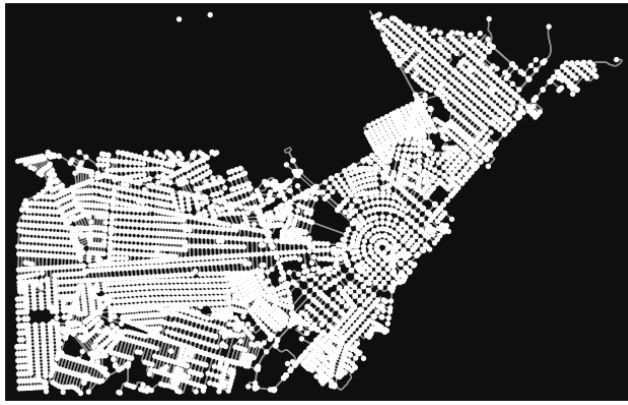


Fig. 1 Grafo representando as áreas de interesse da cidade de Boa Vista-RR

Identificamos no site Moovit ⁴ cinco rotas de ônibus que passam entre os destinos: 211, 252, 301, 501 e 502, para obter variações de paradas que possam compor a rota a ser criada. Coletamos as coordenadas dessas paradas e associamos cada uma delas ao vértice mais próximo no mapa. O peso de cada vértice foi definido como o número de vezes que uma parada de ônibus foi atribuída a ele, indicando a intensidade de passagem de pessoas por aquele ponto. A Figura 2 é um gráfico que mostra o resultado dessa associação, em colorido estão as paradas de ônibus das rotas selecionadas no grafo criado anteriormente. O tom da parada mostra a frequência com que essa parada é visitada pelos ônibus, que serve como nosso indicador de quantidade de pessoas.

Grafo de Boa Vista com Pesos das Paradas

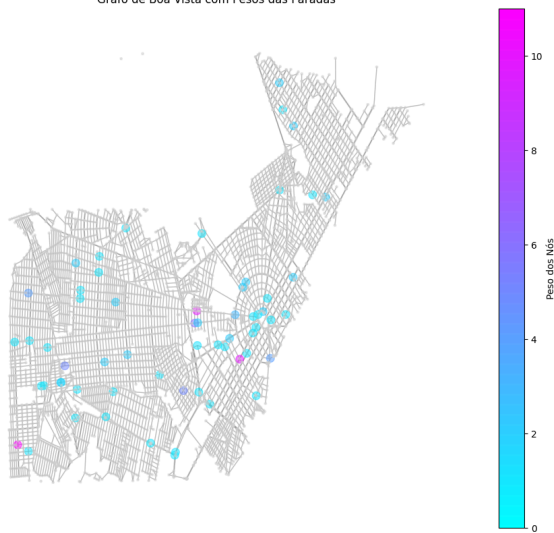


Fig. 2 Grafo de Boa Vista-RR com paradas e pesos destacados

Criamos uma tabela heurística com a distância (seguindo por ruas do mapa) de cada parada uma das outras, de modo a criar um grafo interligado com apenas os vértices que representam paradas de ônibus. Esse grafo foi o utilizado para encontrar qual a melhor sequência de paradas.

B. Procura da melhor rota

Existem várias maneiras de encontrar soluções

aproximadas para o TSP, dentre elas a que escolhemos utilizar Simulated Annealing.

O algoritmo de Simulated Annealing é uma técnica de otimização inspirada no processo de resfriamento de metais. Ele começa com uma solução inicial em uma temperatura específica. A cada iteração, o algoritmo explora as soluções vizinhas da solução atual. Se uma solução melhor é encontrada, ela é aceita. Se uma solução pior é encontrada, essa solução pode ser aceita com uma certa probabilidade que depende da temperatura atual. À medida que as iterações avançam, a temperatura é gradualmente diminuída, reduzindo a probabilidade de aceitar soluções piores. Isso ajuda o algoritmo a convergir para uma solução ótima ao longo do tempo, equilibrando a exploração de novas soluções e a exploração das melhores conhecidas ⁶.

Ao final de cada iteração, é calculada a função de custo que define o quão “boa” foi a rota criada. Sendo a distância total a soma das distâncias percorridas e peso total a soma do peso dos vértices visitados, essa função é definida por:

$$\alpha * distanciaTotal - (1 - \alpha) * pesoTotal$$

Os parâmetros que utilizamos para o SA foram temperatura inicial igual à 1000, resfriamento igual à 0.980, e 2000 como quantidade de iterações. A complexidade total do algoritmo simulated annealing adaptado que implementamos, desconsiderando o carregamento do grafo, é de:

$$O(K * n)$$

onde:

- K é o número de iterações (2000).
- n é o número de nós na rot

Esse resultado provém das funções utilizadas no código:

- A complexidade da função `funcao_custo` é $O(n)$
- A complexidade da função `gerar_vizinho` é $O(1)$
- A complexidade da função `simulated_annealing` é $O(k * n)$

III. RESULTADOS

Mesmo utilizando o mesmo fator alfa para a criação de diversas rotas, algumas buscaram o maior número de pessoas e acabaram percorrendo uma distância maior e outras fizeram o percurso em menor distância, mas tiveram um peso de pessoas menor. Utilizamos a biblioteca matplotlib para criar as imagens das rotas. Como destaque tivemos:

A. Rota que busca mais pessoas

TABELA I

RESULTADOS ROTA COM MAIOR NÚMERO DE PESSOAS

	Rota com maior número de pessoas
Custo total	12976.756
Distância total	32,495 Km
Peso total	36.0

Grafo de Boa Vista com Rota Simulated Annealing



Fig. 3 Rota que teve o maior número de pessoas

B. Rota Mais curta

TABELA II
RESULTADOS ROTA MAIS CURTA

	Rota com maior número de pessoas
Custo total	11529.8336
Distância total	28,848 Km
Peso total	16.0

Grafo de Boa Vista com Rota Simulated Annealing

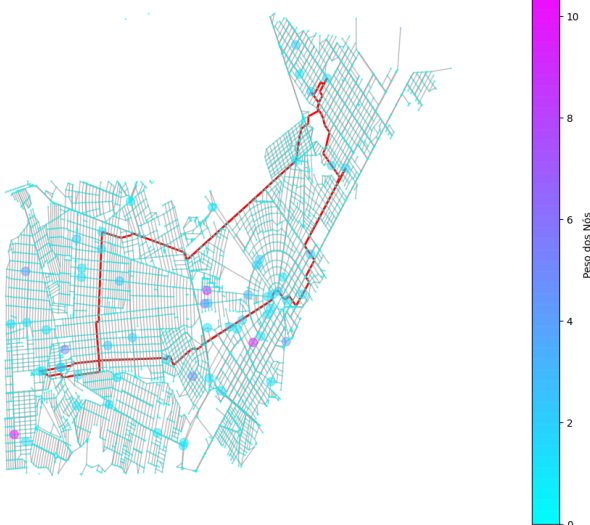


Fig. 4 Rota mais curta

C. Rota mais equilibrada

TABELA III
RESULTADOS ROTA MAIS EQUILIBRADA

	Rota com maior número de pessoas
Custo total	13244.3020
Distância total	33,142 Km
Peso total	21.0

Grafo de Boa Vista com Rota Simulated Annealing

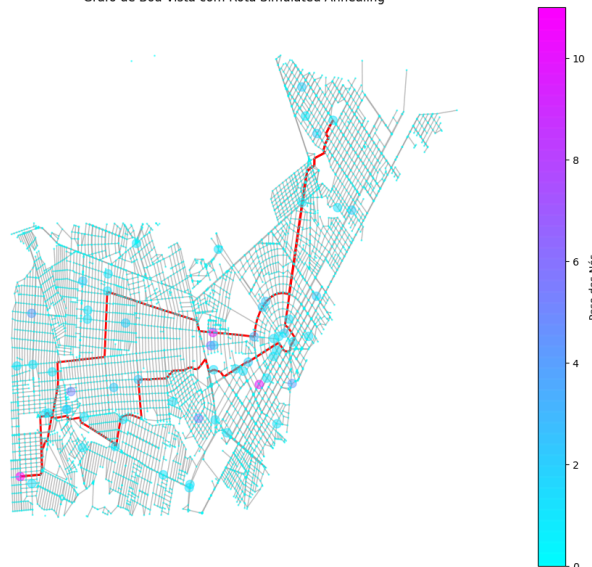


Fig. 5 Rota mais equilibrada

IV. CONCLUSÃO

O Problema do Caixeiro Viajante é uma questão desafiadora no campo da otimização, com diversas aplicações práticas em áreas como logística e transporte público. Embora sua resolução exata seja impraticável para grandes instâncias devido à sua complexidade NP-completa, técnicas aproximadas, como o Simulated Annealing, têm demonstrado grande eficiência ao encontrar soluções próximas ao ótimo em tempo aceitável.

Neste trabalho, foi possível implementar um algoritmo baseado no Simulated Annealing para resolver o problema do TSP no contexto de roteamento de ônibus em Boa Vista-RR. A abordagem utilizada permitiu balancear dois objetivos distintos: maximizar o número de passageiros transportados e minimizar o tempo de viagem. O uso de heurísticas como a ponderação de vértices com base no fluxo de passageiros contribuiu para a criação de rotas mais realistas e aplicáveis.

No entanto, o trabalho também apresentou algumas limitações. Primeiro, o grafo utilizado é extenso, o que aumenta o tempo de processamento e exige mais recursos computacionais. Em segundo lugar, a quantidade de paradas de ônibus não representa necessariamente o fluxo real de pessoas, uma vez que o peso de cada vértice foi atribuído com base na frequência de passagem dos ônibus, sem considerar variações no número de passageiros ao longo do dia ou sazonalidades. Isso pode distorcer as soluções

propostas pelo algoritmo, que podem não ser ideais para situações reais de uso.

Além disso, o uso de heurísticas, apesar de eficiente, não garante uma solução ótima, o que significa que soluções melhores podem ser encontradas com o refinamento dos parâmetros ou com a aplicação de outros algoritmos de otimização.

Em geral, os resultados experimentais mostram que diferentes configurações de parâmetros podem gerar soluções otimizadas para cenários variados, seja para priorizar a maximização de passageiros, a minimização da distância percorrida ou o equilíbrio entre ambos. A flexibilidade do Simulated Annealing se mostrou valiosa nesse contexto, oferecendo soluções para diferentes demandas.

Em conclusão, a aplicação de métodos aproximados como o Simulated Annealing, em conjunto com uma modelagem cuidadosa do problema e parâmetros bem ajustados, pode fornecer soluções eficientes e de qualidade para o problema do Caixeiro Viajante Multi-Objetivo no transporte público, como o caso específico da cidade de Boa Vista-RR.

REFERENCIAS

- [1] C. Dahiya and S. Sangwa, "Literature Review on Travelling Salesman Problem ", June 16, 2018
- [2] P. Ertel, "Uma abordagem contínua para o problema do caixeiro viajante", march, 2023
- [3] H. Tsay and J. D. Fricker, "Practical Approach for Solving School Bus Problems ", 1988.
- [4] G. Boeing, "Modeling and Analyzing Urban Networks and Amenities with OSMnx ", july, 2024.
- [5] Moovit. "Transporte Público - Boa Vista", Moovit. [Online]. Disponível:
https://moovitapp.com/index/pt-br/transporte_p%C3%BAblico-lines-Boa_Vista-4307-924570.
- [6] N. Erbakan University, Engineering and Architecture Faculty, Industrial Engineering Dept., Konya, Turkey, Analysis of TSP: Simulated Annealing and Genetic Algorithm Approaches, 2025
- [7] V. Jordão and G. Garbácio, "Caixeiro Viajante," GitHub Repositório, Disponível em:
https://github.com/vitor1616/VitorJordao_GiovannaGarbacio_FinalProject_AA_RR_2024.