

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

OTIMIZAÇÃO DE UMA ROTA DE ÔNIBUS DA CIDADE DE SANTOS ATRAVÉS DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE COM COLETA DE PRÊMIOS

JOÃO V. L. SILVA¹, LUIZ H. C. RAMOS², GLAUBER R. COLNAGO³

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação IFSP, Campus Cubatão, lima.vitor1@aluno.ifsp.edu.br.

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação IFSP, Campus Cubatão, l.cordeiro@aluno.ifsp.edu.br.

³ Professor Doutor EBTB de Matemática no IFSP, Campus Cubatão, glauber.colnago@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.08.02.00-8 Pesquisa Operacional

RESUMO:

Este artigo tem como objetivo apresentar o resultado da otimização de uma rota de ônibus da cidade de Santos. A rota escolhida é uma das rotas intermunicipais mais movimentadas da cidade. O modelo foi formulado como um problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios, sendo que o objetivo é a minimização do tempo total do trajeto do ônibus, e os prêmios são as quantidades de usuários atendidos. Neste problema, fixou-se apenas os pontos inicial e final, e a sequência dos demais foi estabelecida como variável. Os endereços dos pontos foram obtidos no site da empresa responsável, os tempos de trajeto entre cada par de pontos foram obtidos utilizando o Google Maps, considerando vários horários do dia, e a quantidade relativa de usuários nos pontos foram definidas utilizando um mapa de densidade demográfica da cidade. Foi utilizado para resolver o problema o *solver* Lingo. Resultados mostram que algumas rotas obtidas podem ser mais vantajosas que a atual, dependendo do objetivo da rota, como tempo, passageiros ou distância.

PALAVRAS-CHAVE: Problema do Caixeiro Viajante com Coleta de Prêmios; Otimização Combinatória; Roteamento de Veículos; Transportes Coletivos.

OPTIMIZATION OF A CITY BUS ROUTE IN SANTOS THROUGH THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM WITH PRIZE COLLECTION

ABSTRACT:

This article presents the results of an optimization of a city bus route in Santos, one of the busiest routes in the city. The model was formulated as the Traveling Salesman Problem with Prize Collection, and the objective was the minimization of the total time of the bus travel, and the prizes were the number of users. In this problem, we fixed the initial and final bus points, and the sequence of the other points was considered variable. The point addresses were obtained on the bus company site, the travel route times were obtained by using Google Maps, considering different hours of the day, and the number of users was obtained by using a density demographic map of the city. It was used Lingo to solve the problem. Results show that some routes may be more advantageous than the nowadays route, depending on the purpose of the route, such as time, passengers, or distance.

KEYWORDS: Traveling Salesman Problem with Prize Collection; Combinatorial Optimization; Vehicle Routing; Public Transportation.

INTRODUÇÃO

As rotas de ônibus públicos são importantes para a mobilidade urbana, impactando a qualidade de vida dos usuários de suas linhas. Por um lado, determinadas linhas e horários são muito requisitadas e, por outro, certas linhas podem possuir uma baixa quantidade de usuários, fazendo com que ônibus circulem bem abaixo de sua lotação. Assim, torna-se justificável definir rotas que atendam a um mínimo de pessoas de forma mais rápida.

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) visa criar a menor rota possível entre cidades de um trajeto pode ser usada nesse problema. O PCV tem variações, como o PCV com Coleta de Prêmios (PCVCP), estudado por Souza e Oliveira (2007), em que o viajante coleta prêmios por cada cidade que passa, ou Calheiros (2017), que usa PCV com Passageiros (PCV-P), que usa o mesmo princípio, porém tem como alvo a otimização do número de passageiros ao invés de cidades visitadas.

O presente artigo propõe otimizar as rotas de uma linha de ônibus da cidade de Santos-SP, de forma que seja atendida o maior número de pessoas possível dentro de limites de tempo estabelecidos. No problema proposto, não há a necessidade de percorrer todos os pontos.

MATERIAL E MÉTODOS

A rota escolhida foi uma da linha em que os ônibus passam pelo ponto que cruza a Avenida Affonso Pena e a Avenida Conselheiro Nébias onde, a partir daquele ponto, tem-se a percepção de apresentar demora no trajeto, tendo-se assim a percepção de potencial de se escolher rotas alternativas, o que pode atender mais usuários. Foram sugeridas três rotas, sendo a primeira a original e duas alternativas, a saber:

- **Original:**
 - Avenida Affonso Pena, seguindo para a Avenida Washington Luís, depois para a Rua Braz Cubas, indo até a Rua General Câmara e finalizando a rota analisada chegando até a Avenida São Leopoldo
- **Alternativas:**
 - Avenida Conselheiro Nébias, Avenida Ana Costa e Avenida Bernadinho Campos como opções para o primeiro ponto após o inicial.
 - Avenida Conselheiro Nébias, Rua Braz Cubas e Avenida Bernadinho Campos (túnel) como opções para o ponto anterior ao último ponto do trajeto.

Pode-se ver na Tabela 1 estimativas de tempo da rota completa gerada pelo aplicativo Google Maps, considerando diferentes horários de partida (primeira coluna). A segunda e terceira colunas da tabela possuem, respectivamente, as expectativas de tempo utilizando carro e ônibus. Por fim, a última coluna apresenta a relação entre o tempo usando carro e ônibus. Estas relações foram usadas para gerar a estimativa dos ônibus para cada rota, pois são relações de rotas reais, onde tanto ônibus, quanto carros, passam. Pode-se então estimar tempos de trajetos entre pontos para ônibus, em rotas que atualmente não existem para a linha de ônibus em questão. Para as escolhas das rotas, foram utilizados quatro caminhos iniciais, que podem seguir para 3 caminhos diferentes e resultando no final do trajeto, estes caminhos são: a Avenida Bernadino Campos (túnel), o caminho pela Rua Braz Cubas e a Conselheiro Nébias e após estas opções todas acabam no final do trajeto na Avenida Visconde de São Leopoldo.

Tabela 1. Relação entre o tempo de trajeto de carro e ônibus da rota completa

Horário	Tempo de carro no trajeto completo	Tempo de ônibus do trajeto completo	Relação entre tempo de carro e tempo de ônibus
6h	14 min	17 min	0,824
9h	18 min	20 min	0,900
12h	16 min	18 min	0,889
15h	16 min	16 min	1,000
18h	18 min	16 min	1,125

Fonte: Autoria própria.

Assim, foi usado o Google Maps para estimar o tempo de trajeto de carro em cada um dos horários para cada trecho de cada trajeto. A partir dos tempos, utilizou-se as relações da Tabela 1 para obter tempos esperados para ônibus, conforme pode-se ver na Tabela 2.

Tabela 2: Tempo esperado de ônibus de cada trecho do trajeto calculado para cada horário

Estimativa do tempo dos trajetos de ônibus (minutos)		6h	9h	12h	15h	18h
Trechos dos trajetos						
1 - Av. Affonso Pena	2 - Av. Conselheiro Nébias	2,43	2,22	2,25	2,00	1,78
1 - Av. Affonso Pena	3 - Av. Ana Costa	5,46	7,22	6,75	7,00	8,44
1 - Av. Affonso Pena	4 - Av. Bernadinho Campos	7,89	10,56	10,69	9,50	10,67
1 - Av. Affonso Pena	5 - Av. Washington Luis	2,43	3,33	3,37	3,00	4,44
1 - Av. Affonso Pena	6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	10,32	13,33	14,06	12,50	12,89
1 - Av. Affonso Pena	7 - Rua Braz Cubas	6,07	10,56	9,00	9,50	9,33
1 - Av. Affonso Pena	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	4,85	6,67	6,19	6,00	5,33
1 - Av. Affonso Pena	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	17	20	18	16	16
2 - Av. Conselheiro Nébias	3 - Av. Ana Costa	9,10	11,11	12,37	11,00	11,11
2 - Av. Conselheiro Nébias	4 - Av. Bernadinho Campos	12,74	16,11	16,87	15,50	15,11
2 - Av. Conselheiro Nébias	5 - Av. Washington Luís	7,28	12,22	12,37	11,00	11,11
2 - Av. Conselheiro Nébias	6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	12,74	17,78	16,31	15,50	17,78
2 - Av. Conselheiro Nébias	7 - Rua Braz Cubas	7,28	10,56	10,69	9,50	8,44
2 - Av. Conselheiro Nébias	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	3,64	6,11	6,19	5,50	4,44
2 - Av. Conselheiro Nébias	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	14,56	20,00	19,12	17,00	17,78
3 - Av. Ana Costa	4 - Av. Bernadinho Campos	8,50	11,11	11,25	11,00	9,78
3 - Av. Ana Costa	5 - Av. Washington Luis	5,46	6,67	6,75	6,50	7,11
3 - Av. Ana Costa	6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	7,89	10,56	10,69	9,50	8,44
3 - Av. Ana Costa	7 - Rua Braz Cubas	7,89	10,00	10,12	9,00	8,89
3 - Av. Ana Costa	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	9,10	10,56	11,81	11,00	10,22
3 - Av. Ana Costa	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	10,32	13,33	11,81	10,50	10,67
4 - Av. Bernadinho Campos	5 - Av. Washington Luís	10,32	12,22	12,37	11,00	12,00
4 - Av. Bernadinho Campos	6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	7,28	10,00	9,00	8,00	8,00
4 - Av. Bernadinho Campos	7 - Rua Braz Cubas	10,32	15,00	13,50	12,50	12,00
4 - Av. Bernadinho Campos	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	13,35	16,67	15,19	14,00	13,33
4 - Av. Bernadinho Campos	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	11,53	13,33	13,50	11,00	12,00
5 - Av. Washington Luís	6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	14,56	12,22	12,37	11,00	11,11
5 - Av. Washington Luís	7 - Rua Braz Cubas	3,64	6,11	5,62	5,00	4,89
5 - Av. Washington Luís	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	4,85	7,78	7,31	6,50	6,22
5 - Av. Washington Luís	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	14,56	15,00	15,19	12,50	12,89
6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	7 - Rua Braz Cubas	6,67	10,00	9,00	8,00	8,00
6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	8,50	12,22	10,69	10,00	8,44
6 - Av. Bernadino Campos (Túnel)	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	7,28	8,89	7,87	7,00	7,11
7 - Rua Braz Cubas	8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	6,07	7,22	7,31	6,50	6,22
7 - Rua Braz Cubas	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	6,67	10,56	9,00	8,00	7,11
8 - Av. Conselheiro Nébias (2º ponto)	9 - Av. Visconde de São Leopoldo	9,10	13,89	13,50	11,00	9,78

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados coletados e calculados, foi escolhido o *solver* Lingo para resolução do problema. A partir dos dados da Tabela 2, criou-se uma matriz quadrada, para cada horário, com a dimensão equivalente aos nove pontos utilizados. A matriz criada é simétrica, ou seja, considera que o tempo entre dois pontos é mesmo, independente do sentido. A diagonal principal possui valores nulos, uma vez que é o tempo de trajeto de um ponto a ele mesmo. Os pontos 1 e 9 são fixos representando, respectivamente, os pontos inicial e final. A ordem dos demais pontos ficou livre para o solver buscar a melhor rota, podendo eliminar algum ponto.

Utilizou-se como base a formulação matemática do PCVCP proposta por Sousa e Oliveira (2007). Neste modelo, não há a necessidade de passar por todos os pontos, mas quando um ponto não é visitado, perde-se o prêmio a ele associado. No caso, utilizou-se aqui a quantidade de pessoas atendidas como esta bonificação. A variável binária X_{ij} indica se o ônibus foi do ponto i ao j , e t_{ij} é o tempo de percurso entre os dois pontos. Assim, verifica-se em (1), que a primeira parcela da função objetivo é o tempo

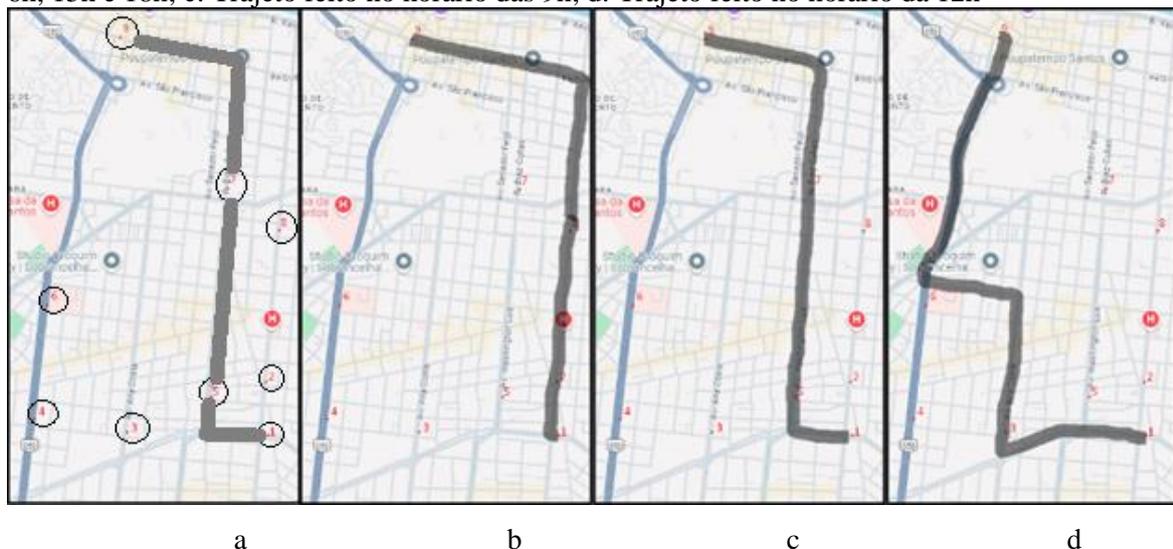
total no trajeto, a ser minimizado. A segunda parcela utiliza a variável binária Y_{ij} , que indica se o ponto foi visitado. No caso de o ponto não ter sido visitado, $p_i(1 - Y_{ij})$ vale 0 e então não se perde o prêmio p_i , que é, neste caso, a quantidade de pessoas atendidas em um ponto. As equações (2) e (3) indicam que, se o ponto foi visitado, $Y_i = 1$ e deve-se chegar e sair do ponto. A equação (4) estabelece uma quantidade mínima de pessoas a serem atendidas. A equação (5) considera f para identificação da ordem dos pontos percorridos e (6) estabelece que os valores de f não ultrapassem o número de pontos menos um. (7) e (8) são restrições de conjunto e (9) garante que f não assuma valores negativos. A equação (10) fixa que o ônibus não vá de um ponto a ele mesmo, e (11) garante a conexão do último ponto ao primeiro, para fechar o ciclo. A restrição (12) define o valor máximo de tempo e (13) o número máximo de pessoas atendidas. Os índices i e j variam de 1 a 9, a quantidade total de pontos disponíveis.

$$\begin{aligned} & \text{Min } \sum_i \sum_j t_{ij} X_{ij} + \sum_i p_i (1 - Y_{ij}) & (1) \\ \text{s.a} & & \\ & \sum_{j \neq i} X_{ij} = Y_i & (2) \\ & \sum_{i \neq j} X_{ij} = Y_j & (3) \\ & \sum_i p_i Y_i \geq p_{\text{Min}} & (4) \\ & \sum_j f_{ij} - \sum_{j \in n} f_{ji} = Y_i & (5) \\ & f_{ij} \leq (n - 1) X_{ij} & (6) \\ & X_{ij} \in \{0,1\} & (7) \\ & Y_i \in \{0,1\} & (8) \\ & f_{ij} \geq 0 & (9) \\ & X_{ii} = 0 & (10) \\ & X_{91} = 1 & (11) \\ & \sum_i \sum_j t_{ij} X_{ij} \leq t_{\text{max}} & (12) \\ & \sum_i p_i - \sum_i p_i (1 - Y_i) \leq p_{\text{max}} & (13) \end{aligned}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram feitas simulações para as quatro opções de horários, estabelecendo o máximo de tempo de 20 minutos. As quantidades de pessoas nos pontos foram distribuídas proporcionalmente, de acordo com o mapa de densidade demográfica obtido em Carriço (2024). A quantidade máxima de pessoas a serem atendidas foi definida em 66, que se refere à lotação real de um ônibus convencional da empresa EMTU obtida através do site da Rede de transporte (2024).

Figura 1. a: Trajeto original e os demais pontos considerados no estudo; b: Trajeto feito nos horários das 6h, 15h e 18h; c: Trajeto feito no horário das 9h; d: Trajeto feito no horário da 12h



Fonte: Autoria própria.

A Figura 1a apresenta o trajeto original e os demais pontos considerados no estudo. A rota original é percorrida em aproximadamente 17 minutos às 6h da manhã, atendendo uma estimativa de 25 pessoas. A Figura 1b apresenta a rota otimizada para os horários das 6h, 15h e 18h, com os tempos de 19,42, 20 e 19,55 minutos, respectivamente. Para todas as rotas citadas, a quantidade de pessoas atendidas foi de 35. A Figura 1c apresenta a rota otimizada para as 9h, com um tempo de 20 minutos e 25 pessoas atendidas. A Figura 1d apresenta a rota para o horário das 12h, com o tempo de 18 minutos e a quantidade de pessoas atendidas de 25.

Com o objetivo de maximizar o número de pessoas atendidas, foi utilizado o horário das 6h como referência, com o tempo máximo variando de 20 a 30 minutos, com incremento de 1 minuto. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tempos e pessoas atendidas alterando a restrição de tempo máximo referente às 6h

	Tempo do trajeto (minutos)	Tempo máximo estipulado (minutos)	Pessoas atendidas	Trajeto
	19,42	20	35	1-5-4-9
	20,02	21-22	45	1-5-7-6-9
	22,45	23-29	55	1-5-4-6-9
	29,73	30	65	1-2-5-4-6-9
Rota real	17		25	1-5-7-9

Fonte: Autoria própria.

Os resultados referentes aos 5 horários diferentes apresentaram um pequeno aumento no tempo do trajeto, porém é compensado através da quantidade de pessoas que foram atendidas. A mesma lógica se apresenta para o resultado específico das iterações para o horário das 6h, mostrando que a otimização acaba priorizando mais a quantidade de pessoas do que o tempo que se leva para completar o trajeto.

CONCLUSÕES

Este artigo conseguiu executar seu objetivo de alcançar uma otimização da rota de ônibus na cidade de Santos através da minimização de funções de tempo e de maximização de pessoas atendidas, para que se obtivesse uma rota que fosse melhor em ambos os quesitos, apresentando resultados para 5 horários diferentes. Algumas rotas são mais vantajosas que outras, dependendo exclusivamente do tráfego de veículos que alteram o tempo que se leva entre um ponto e outro, como também outras rotas são melhores caso apenas busque aumentar a quantidade de pessoas atendidas, mesmo que isso acabe ocasionando em um tempo maior do trajeto. Deve-se também levar em conta que a rota real atualmente praticada do ônibus pode ter sido escolhida por motivações e justificativas que este artigo não busca abordar.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

J.V.L.S e L.H.C.R. contribuíram na obtenção e análise de dados. J.V.L.S. e G.R.C. procederam com a metodologia. J.V.L.S. realizou a obtenção de resultados. J.V.L.S e L.H.C.R. atuaram na redação do artigo. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

REFERÊNCIAS

- CALHEIROS, Z. S. A. O problema do caixeiro viajante com passageiros. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil. 2017.
- CARRIÇO, J. M. A estagnação da densidade demográfica na área insular de Santos. Online. Disponível em: <<https://marcosocosta.wordpress.com/2011/09/22/a-estagnacao-da-densidade-demografica-na-area-insular-de-santos/>>. Acesso em 30 de agosto de 2024.
- Rede de transporte. Online Disponível em: <<https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/redes-de-transporte/renovacao-da-frota-rmc.fss>>. Acesso em 30 de agosto de 2024.
- SOUSA, M. J. de; OLIVEIRA, A. L. de. Metaheurísticas híbridas para resolução do problema do caixeiro viajante com coleta de prêmios. Produção, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 289-302, 2007.