



ConBRepro

XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



IA nas Engenharias

29 nov. a 01
de dezembro 2023

Otimização da rota de transporte de discentes: uma adaptação do problema do caixeiro viajante assimétrico

Sheila Dárcia Diógenes de Freitas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

Mércia Máira Araújo dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

Andressa Aquino Lima

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

Rillianny Karen Silva Freires

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

Caio Augusto Nunes Marques

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – campus Quixadá

Resumo: O transporte público é um dos muitos obstáculos da vida acadêmica e é necessário para que o estudante consiga cumprir sua rotina diária. A otimização da rota desses transportes pode resultar no conforto para esses estudantes, redução de custos e diminuição da emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Sendo assim, este artigo tem como objetivo fornecer uma rota otimizada para um ônibus universitário que realiza diariamente a rota entre Itapiúna para Quixadá, minimizando a distância percorrida, garantindo que todos os estudantes sejam deixados em suas respectivas instituições percorrendo o menor trajeto possível. Para isso, foram coletados dados sobre os pontos de embarque e desembarque dos estudantes, e o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) foi adaptado, dividindo o problema em dois subproblemas. Após isso foi elaborado um modelo matemático foi desenvolvido e resolvido usando o software CPLEX® para encontrar uma solução ótima. A análise comparativa entre a rota original e a rota otimizada revelou uma redução diária de 0,582%, o que representa uma diminuição anual de 160 km e uma economia de R\$ 130,18 em gastos com combustível, além da redução dos Gases de Efeito Estufa. Para trabalhos futuros propõe-se a análise das demais rotas percorridas por esse transporte em outros turnos, além da disseminação da aplicação do problema para outros transportes da secretaria que realizam rotas com o mesmo objetivo.

Palavras-chave: Transporte Escolar, Otimização de Rota, Problema do Caixeiro Viajante

Optimizing Student Transportation Routes: An Adaptation of the Asymmetric Traveling Salesman Problem

Abstract: Public transportation is one of the many challenges in academic life and is essential for students to fulfill their daily routines. Optimizing the routes of these transportation systems can result in comfort for these students, cost reduction, and a decrease in Greenhouse Gas Emissions (GHG). Therefore, this article aims to provide an optimized route for a university bus that daily travels the

route from Itapiúna to Quixadá, minimizing the distance covered and ensuring that all students are dropped off at their respective institutions using the shortest route possible. To achieve this, data on student pick-up and drop-off points were collected, and the Traveling Salesman Problem (TSP) was adapted, dividing the problem into two sub-problems. Subsequently, a mathematical model was developed and solved using the CPLEX® software to find an optimal solution. The comparative analysis between the original and optimized routes revealed a daily reduction of 0.582%, which translates to an annual decrease of 160 km and a savings of R\$ 130.18 in fuel costs, in addition to a reduction in GHG emissions. For future work, we propose analyzing the other routes taken by this transportation system during other shifts, as well as extending the application of the problem to other departmental transportation systems with similar objectives.

Keywords: School Transportation, Route Optimization, Traveling Salesman Problem

1. Introdução

De acordo com a Constituição Federal de 1988, os estudantes oriundos de escola pública detêm o direito ao transporte escolar, como uma forma de possibilitar o acesso à educação (BRASIL, 1988). A Lei nº 9.394/96, também conhecida como Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB), sublinha que cabe ao Estado viabilizar não só o material didático, alimentação e assistência à saúde, mas também o transporte (BRASIL, 1996).

Segundo Silva (2021), a vida acadêmica é composta de múltiplos obstáculos, como cumprimento de carga horária, matriz curricular, consecução de metas, objetivos e para que o estudante consiga completar essa jornada é essencial que esse acesso a instituição seja facilitado, sendo primordial um transporte escolar eficiente. O modo como se dá o transporte dos estudantes é uma preocupação do corpo docente das instituições, que discute sobre o quanto esse transporte pode afetar no rendimento dos alunos, além da sua influência em outras atividades da instituição (ALVES, 2015).

Em vista de tais considerações, o aperfeiçoamento do gerenciamento logístico assume um papel relevante, buscando garantir a eficiência do transporte escolar, mediante a redução do tempo de deslocamento, aumentando a segurança e contenção de despesas. A melhoria no gerenciamento logístico não atende apenas às necessidades dos alunos e redução de custos, mas também contribui para a sustentabilidade, pois diminui a emissão de poluentes no transporte escolar.

O presente estudo foi realizado na Prefeitura Municipal de Itapiúna no estado do Ceará, no qual a Secretaria de Educação fez a contratação de uma empresa terceirizada para a locação de um ônibus que atendia a demanda dos alunos que iam de Itapiúna até Quixadá-CE. O traslado analisado é executado durante à noite, sem que haja sequência preestabelecida para as paradas, ocasionando muitas vezes atrasos tanto no início quanto no término da jornada acadêmica, impactando no processo de ensino-aprendizagem, já que os discentes acabam perdendo parte das aulas e conteúdos ministrados por conta dos atrasos.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é propor uma rota que minimize a distância total comumente percorrida pelo ônibus, através da determinação de uma rota única, de modo a fazer o desembarque de todos os estudantes em suas respectivas instituições percorrendo a menor quilometragem possível. Para alcançar o objetivo proposto, foi empregado o conceito do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), com suas devidas adaptações para contemplar as restrições deste caso específico, e feito o uso do software IBM CPLEX® para a determinação da solução ótima do modelo.

Este artigo está dividido em cinco seções: a primeira que contextualiza o problema e afunilada o estudo, a segunda que traz uma revisão teórica para apresentar os temas abordados. A terceira, que é a metodologia, apresenta como foi desenvolvido o trabalho e

encontrados seus resultados, que são descritos na quarta seção para, por fim, apresentar as conclusões na quinta seção.

2. Referencial Teórico

2.1 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional (PO) teve origem no século XX, quando cientistas na Inglaterra começaram a utilizar métodos científicos para tomar as decisões durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de otimizar recursos (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). A Pesquisa Operacional pode ser definida como a utilização de métodos matemáticos para abordar desafios em sistemas complexos, contribuindo para tomada de decisões (OPERATIONAL RESEARCH SOCIETY, 2021).

A PO pode ser utilizada para auxiliar em decisões estratégicas de empresas e organizações, por possibilitar a otimização dos recursos, que impacta nos orçamentos (BARBOSA, 2022). Sendo amplamente estudada durante a graduação e pós-graduação, esta abordagem correlaciona ciência e arte através de formulações matemáticas, necessitando de criatividade para traduzir desafios do cotidiano em modelos que podem ser otimizados (ARENALES *et al.*, 2015).

No contexto dos processos decisórios a pesquisa operacional é uma das abordagens mais expressivas, como destacado com Longaray (2013), pois ela busca o melhor caminho para a resolução de problemas, também conhecida como solução ótima, que pode ser aplicada nos setores de manufatura, construção civil, transportes, entre outros (HILLIER; LIEBERMAN 2013).

2.2 Modelagem matemática em programação linear inteira

A modelagem matemática em Programação Linear Inteira é uma abordagem que permite a solução de problemas complexos de otimização em que as variáveis de decisão são restritas a valores inteiros e binários (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). Esse tipo de programação linear pode ser aplicado em cenários em que é necessário tomar decisões com base em um conjunto limitado de opções inteiras, como alocação de recursos, programação de produção ou roteamento de veículos, ou seja, uma ampla variedade de problemas de otimização, que são eles os problemas do caixeiro viajante, problemas da mochila, problemas de corte, entre outros (ARENALES *et al.* 2015).

Segundo Belfiore e Fávero (2013), a modelagem matemática é uma etapa importante do processo de resolução de problemas, pois traduz o problema real em um modelo matemático para que possa ser resolvido, sendo composto pela função objetivo, as variáveis de decisão e restrições, sendo elas:

- a) Função objetivo: é uma expressão matemática que representa o objetivo que se deseja atingir em um problema de otimização, geralmente seu valor deve ser maximizado ou minimizado;
- b) Variáveis de decisão: são os parâmetros que representam as escolhas que devem ser feitas para resolver um problema de otimização, sendo essas variáveis geralmente desconhecidas e que precisam ser determinadas por meio de cálculos matemáticos para encontrar a solução ótima;
- c) Restrições: são as limitações ou condições que devem ser levadas em consideração ao resolver um problema de otimização.

2.3 Problema do caixeiro viajante

Segundo Arenales *et al.* (2015), o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um problema de otimização combinatória no qual busca-se determinar a rota de menor comprimento que um caixeiro deve percorrer para visitar um conjunto de cidades, partindo de um ponto inicial e chegando a um final. Este problema tem como objetivo encontrar o caminho mais curto que o caixeiro deve seguir para passar por todas as cidades exatamente uma vez antes de retornar à cidade inicial (COLIN, 2018).

Arenales *et al.* (2015) explicam que, sendo c_{ij} a distância entre i e j , quando c_{ij} é igual a c_{ji} , o PCV é classificado como simétrico, caso contrário, se classifica como assimétrico. Segundo os mesmos autores, o PCV assimétrico apresenta a seguinte formulação matemática:

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o caixeiro vai de } i \text{ para } j, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Função objetivo:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = 1, \dots, n, j \neq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n, i \neq j \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} x_{ij} \geq 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad (6)$$

$$x \in B^{n(n-1)} \quad (7)$$

As variáveis da decisão (1) estabelecem se o caixeiro vai ou não passar pela cidade, a função objetivo (2) busca a minimização total da rota traçada, já as restrições (3 e 4) estabelecem condições para o problema ser resolvido, fazendo com que a cidade seja visitada somente uma vez, podendo possuir a restrição que buscam eliminar uma sub-rota desconexa (5 e 6), que pode ser gerada ao solucionar o modelo, já a restrição (7) estabelece que as variáveis do problema são binárias (ARENALES *et al.*, 2015).

3. Metodologia

O estudo realizado possui natureza quantitativa, pois de acordo com Paschoarelli, Medola e Bonfim (2018), um estudo quantitativo utiliza variáveis numéricas para a análise do problema e faz uso de métodos matemáticos. Quanto à metodologia, foi utilizado o estudo de caso, tendo em vista que foi buscada a compreensão de forma ampla do problema,

contendo uma análise dos dados, que podem ser utilizados para propor soluções (GIL, 2017).

Este trabalho seguiu as etapas de um estudo de pesquisa operacional conforme proposto por Taha (2008), as quais incluem a formulação do problema, construção do modelo, solução do modelo e sua validação, como mostra a Figura 1. A etapa final, de implementação da solução, ficou fora do escopo deste estudo.

Figura 1 - Fases de um estudo de Pesquisa Operacional



Fonte: Adaptado de Taha (2008)

Durante a formulação do problema é realizada uma análise detalhada sobre o problema em questão, para que sejam identificadas as principais variáveis envolvidas, restrições e objetivo (TAHA, 2008). Visto isso, nessa primeira etapa se teve como objetivo a redução das distâncias percorridas pelo ônibus universitário que faz o traslado de alunos entre Itapiúna e Quixadá, sendo determinados os pontos que os alunos fazem o embarque e desembarque, esperando a minimização das distâncias.

Em um segundo momento foi desenvolvido com base na formulação do problema, um modelo matemático que representasse de forma precisa e completa o problema em questão. Visto isso, foram coletadas informações na Secretaria de Educação da Prefeitura Municipal de Itapiúna, sobre as localizações dos pontos de parada, bem como as distâncias entre cada par de pontos, que foram obtidas utilizando o Google Maps e com base nesses dados, um conjunto de equações foi elaborado para representar a situação real do transporte universitário.

Na etapa de Solução do modelo, para obter a solução ótima, foi adotado inicialmente o software IBM CPLEX®, logo após foi utilizada a heurística do vizinho mais próximo para solução de PCV assimétrico, que permitiu traçar uma nova rota alternativa para comparar os resultados encontrados e buscar a melhor solução. Por fim, foram criados os grafos com as rotas encontradas, comparadas as rotas, além do impacto no custo com essa redução das distâncias.

Na etapa de validação do modelo, em conformidade com a metodologia proposta por Taha (2008), os resultados foram analisados e comparados com a rota utilizada frequentemente. Após a comparação, foi sugerido o novo trajeto ao responsável pela execução da rota.

4. Resultados e discussão

4.1. Definição do Problema

Os dados utilizados para a elaboração deste estudo tiveram origem na Secretaria Municipal de Educação do município de Itapiúna, que forneceu informações sobre os pontos de parada do ônibus universitário responsável pelo transporte dos estudantes de Itapiúna a Quixadá. De acordo com os dados levantados, o ônibus, que faz este trajeto no turno da noite, tem dois pontos de coleta dos estudantes em Itapiúna, sendo inicialmente a Prefeitura e logo após um ponto rodoviário (de 1 a 2), representados na Tabela 1. As paradas para desembarque acontecem em seis instituições de ensino em Quixadá, sendo elas: Feclesc, IFCE/UFC, Unopar, UniCatólica, Uniplan e CEP (do 3 ao 8).

A Figura 2a, apresenta a localização dos pontos de parada em Quixadá, enquanto a Figura 2b mostra os dois pontos de parada dos alunos em Itapiúna, sendo ambas as imagens

elaboradas utilizando o software Google Earth®. Tais informações foram compiladas e apresentadas na Tabela 1.

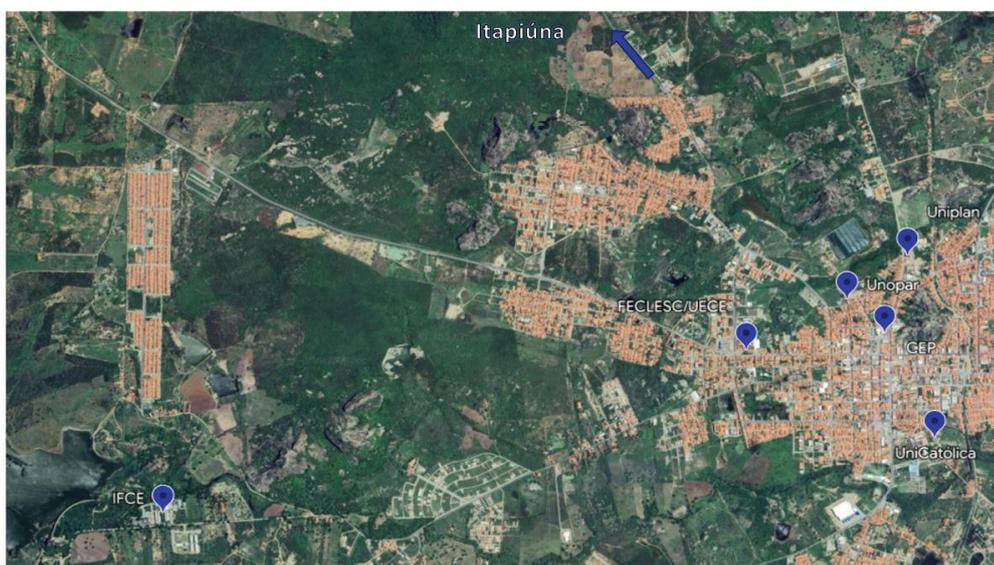
Tabela 1 - Pontos de embarque e desembarque dos universitários

ID	Ponto de Parada	ID	Ponto de Parada
1	Parada 1 - Prefeitura	5	UNOPAR
2	Ponto 2 – Parada das topics	6	UniCatólica
3	FECLESC	7	UNIPLAN
4	IFCE/UFC	8	CEP

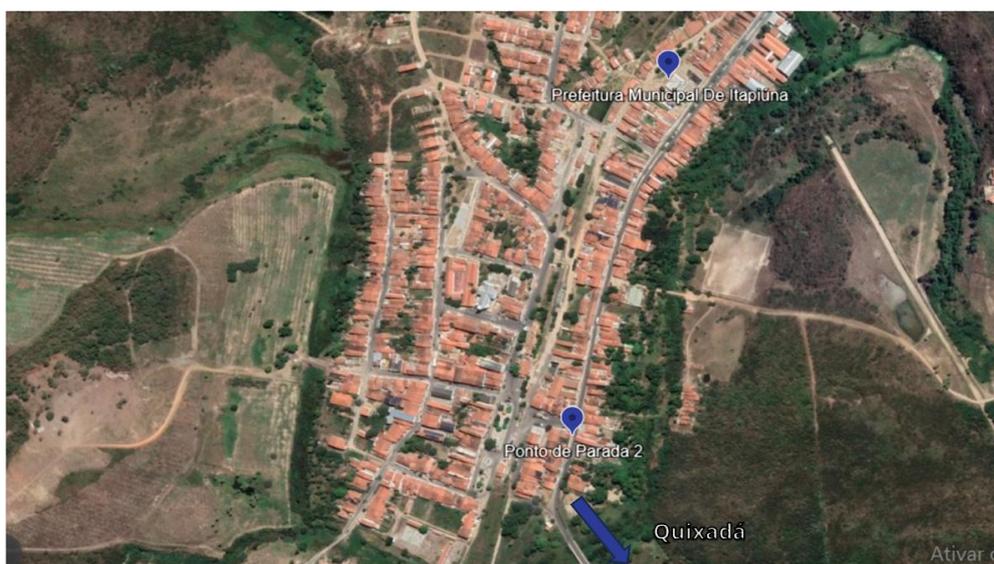
Fonte: Autores (2023)

Figura 2 – Localização da saída de Quixadá para Itapiúna e os pontos de desembarque dos estudantes

a)



b)



Fonte: Autores (2023)

O ônibus diariamente percorre este trajeto intermunicipal, não realizando o percurso apenas em finais de semana e feriados. As distâncias percorridas foram determinadas a partir do

software Google Earth® e encontradas as distâncias (em Km) entre os pontos. As distâncias podem ser observadas na Tabela 2.

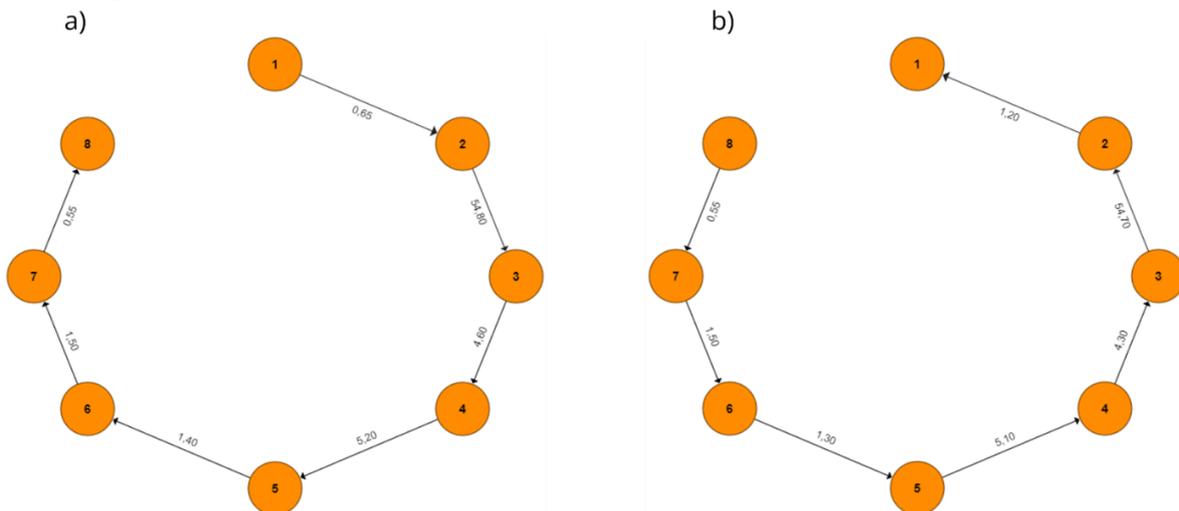
Tabela 2 – Matriz de distâncias (Km) para o PCV do ônibus

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	10000	0,65	55,50	59,60	55,60	56,90	56,40	55,90
2	1,20	10000	54,80	59,00	55,00	56,30	55,70	55,30
3	55,50	54,70	10000	4,60	0,95	1,80	1,60	1,00
4	67,90	59,00	4,30	10000	5,20	5,50	5,80	5,30
5	63,70	54,90	1,7	5,10	10000	1,40	0,80	0,35
6	65,00	56,20	1,90	5,50	1,30	10000	1,50	1,00
7	64,40	55,70	2,40	5,80	0,80	1,50	10000	0,55
8	64,00	55,30	2,00	5,20	0,35	1,00	0,55	10000

Fonte: Autores (2023)

A rota atualmente feita pelo transporte universitário é a seguinte: 1→2→3→4→5→6→7→8 na ida, totalizando 68,70 Km e na volta é a sequência inversa percorrendo 68,65 Km, o que totaliza 137,35 Km percorridos diariamente pelo transporte universitário, o que pode ser visto na Figura 3a (ida) e 3b (volta).

Figura 3 - Grafo das distâncias entre os pontos de parada e rota atual percorrida



Fonte: Autores (2023)

A determinação da rota atual percorrida pelo ônibus universitário não é baseada em algum critério pré-estabelecido, deste modo, cabe ao motorista escolher a sequência dos pontos de parada. É importante destacar que este problema se torna assimétrico devido ao fato de que o trajeto do transporte universitário pode variar dentro das cidades, tendo em vista que algumas vias são de sentido único, ou seja, as distâncias entre os pontos de parada podem ser diferentes na ida e na volta.

4.2 Construção do modelo matemático

Após a análise das distâncias contidas na Tabela 1, foi possível estruturar o modelo matemático para solucionar o problema do transporte universitário, o qual possui como objetivo a minimização da distância percorrida por este ônibus, levando em consideração as variáveis de decisão e restrições, seguindo o modelo apresentado por Arenales *et al.* (2015), apresentados na seção 2.3.

Como o problema apresentado não volta ao ponto inicial fazendo o circuito inverso, o problema não deverá resultar em um circuito hamiltoniano, sendo necessária a divisão das rotas para sua análise. Sendo assim, foram elaborados dois subproblemas, um para a rota de ida e outro para a de volta, tendo como objetivo traçar os melhores trajetos.

Para atingir o objetivo foi necessário modificar o modelo apresentado na seção 2.3, já que as restrições garantem que apenas um arco estivesse chegando em cada nó do grafo, (equação 10), menos na prefeitura, que seria o nó 1 (equação 11). como pode-se observar a seguir:

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o ônibus vai do ponto } i \text{ para o } j, i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, 8; i \neq j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Função Objetivo:

$$\min = \sum_{i=1}^8 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^8 c_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^8 x_{ij} = 1, j = 2, \dots, 8, j \neq i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{ij} = 0, j = 1, j \neq 1 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^8 x_{ij} = 1, i = 1, \dots, 7, i \neq j \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^8 x_{ij} = 0, i = 8, i \neq j \quad (13)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{j \in S \\ j > i}} \leq |S| - 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq 4 \quad (14)$$

$$\sum_{i \in S, j \notin S} x_{ij} \geq 1, S \subset N, 2 \leq |S| \leq 4 \quad (15)$$

$$x \in B^{56} \quad (16)$$

Para determinar a rota de volta de Quixadá para Itapiúna, foi elaborado um modelo semelhante, substituindo as equações que permitiam que o arco chegasse em cada nó do grafo (equação 10) e a que não permitia uma saída (equação 13). Substituindo pelas equações abaixo:

$$\sum_{i=1}^8 x_{ij} = 1, j = 1, \dots, 8, j \neq i \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^8 x_{ij} = 0, j = 8, j \neq i \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^8 x_{ij} = 1, i = 2, \dots, 8, i \neq j \quad (19)$$

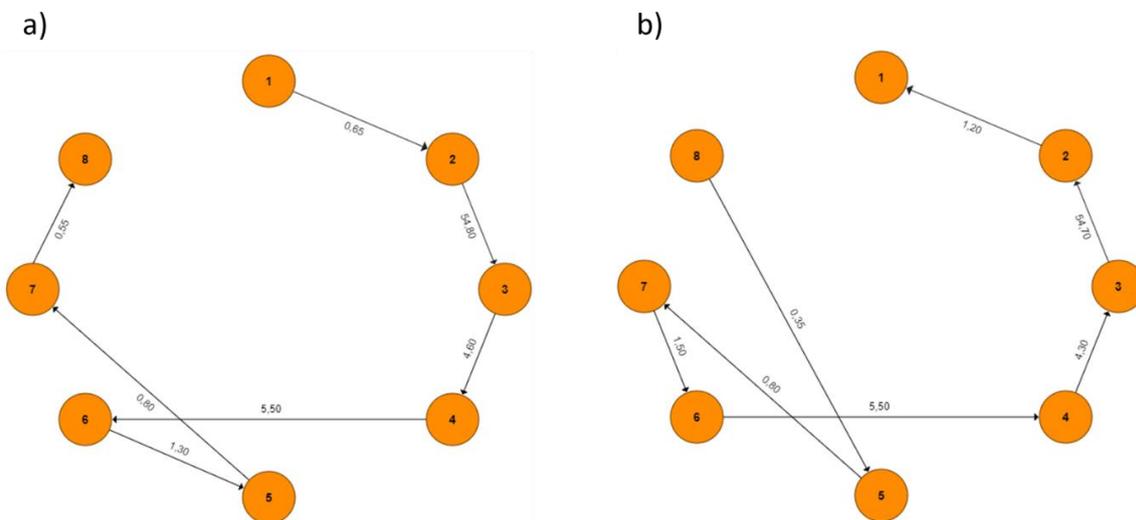
$$\sum_{j=1}^8 x_{ij} = 0, i = 1, i \neq j \quad (20)$$

O ponto inicial do trajeto da volta será o CEP (nó 8), o qual não deve chegar a nenhum arco (equação 18), devendo os demais nós que receberem apenas um arco (equação 17).

4.3 Solução e validação do modelo

Por meio do uso software IBM CPLEX®, tendo a Prefeitura Municipal de Itapiúna como ponto de partida (nó 1), foi determinado que o trajeto ótimo do ônibus deve incluir uma sequência de visitas aos pontos 2, 3, 4, 6, 5, 7 e 8, no trajeto de ida, perfazendo um percurso de 68,2Km. No trajeto de volta, o ônibus parte do nó 8 (CEP) e percorre os pontos 5, 7, 6, 4, 3, 2 e 1 de 68,45Km, totalizando 136,65Km diários (ida e volta). Nas Figuras 4a e 4b estão apresentadas graficamente as rotas de ida e volta, respectivamente.

Figura 4 - Grafos representando as soluções ótimas para a ida (a) e para a volta (b)



Fonte: Autores (2023)

A rota analisada neste trabalho é realizada uma vez durante o turno da noite, ao longo de 200 dias letivos por ano, deste modo, totalizando uma distância percorrida pelo ônibus igual a 27.470 Km. Utilizando a rota ótima gerada pelo CPLEX®, seriam 27.340 Km rodados, o que significa uma redução de 160 Km no total anual.

Tendo em vista que o veículo que atualmente percorre a rota analisada trata-se de um micro-ônibus, foi levado em consideração que, em média, é consumido um litro de óleo diesel para cada 6 Km rodados. Para o cálculo dos custos com combustível, foram

utilizados dados fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2023), considerando o preço médio do litro de diesel no estado do Ceará igual a R\$ 6,01 durante o mês de setembro de 2023.

Na Tabela 3 estão compilados os resultados dos custos obtidos através da solução ótima, para efeito de comparação com a rota atual adotada pelo micro-ônibus.

Tabela 3 - Comparação entre as rotas atual e ótima

Rotas	Dist. Percorrida (Km/dia)	Redução (%)	Distância percorrida (Km/ano)	Custo anual (R\$)	Economia anual (R\$)
Rota atual	137,35	-	27.470	27.515,78	-
Solução ótima	136,65	0,582	27.340	27.385,57	130,18

Fonte: Autores (2023)

Ao analisar as distâncias de ambas as rotas é observada a proximidade entre elas, já que a redução foi de 0,582% em um dia. O que deixa nítido o conhecimento prático eficaz do motorista sobre a rota que é realizada todos os dias letivos, mesmo não sendo teoricamente uma rota ótima. Além disso, são poucos os pontos do trajeto que não estão em uma reta, o que dificulta a otimização.

Além de comparar os custos, foi possível analisar os resultados das emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas pelas duas rotas em questão. Na Tabela 4 estão apresentados os valores calculados por meio da emissão e lançamento de GEE do micro-ônibus universitário a partir da distância percorrida pelo itinerário anualmente. As quantidades específicas de cada tipo de gás estão calculadas em kg por litro, juntamente com os resultados totais de CO₂ em kg e toneladas.

Tabela 4 - Comparação dos gases de efeito estufa entre as rotas atual e ótima

Rota	CO₂ (kg/l)	CH₄ (kg/l)	N₂O (kg/l)	CO₂ (kg)	CO₂ (Toneladas)
Atual	12.041,01	0,504	0,0916	12.080,89	12,081
Solução ótima	11.984,04	0,501	0,0911	12.023,73	12,024
Redução	56,97	0,002	0,00043	57,154	0,057

Fonte: Autores (2023)

Os valores estimados na Tabela 4 acima, fornecem uma análise detalhada dos gases produzidos, conforme definido pelas diretrizes da ABNT NBR ISO 14064 e pelo Guia de Implementação do SEBRAE (2015). A conversão dessas emissões em CO₂ (kg) e toneladas é realizada de acordo com a Equação 13 presente no guia de implementação

Com a utilização da rota proposta, anualmente são economizados 21,66 litros de óleo diesel, o que significa uma redução de 0,057 toneladas de CO₂ jogadas na atmosfera, comparando com a rota atualmente percorrida. Esta abordagem não oferece apenas benefícios econômicos, como também contribui de maneira significativa para a preservação ambiental, reduzindo a emissão de GEE e promovendo práticas mais sustentáveis no contexto do transporte universitário.

5. Considerações finais

O estudo tinha como objetivo minimizar a distância total percorrida pelo ônibus universitário, a partir da determinação de uma rota única, utilizando uma adaptação do problema do

caixeiro viajante de modo a fazer o desembarque de todos os estudantes em suas respectivas instituições com a menor distância possível, que foi alcançado, já que a rota original possuía 137,35 Km percorridos que foram otimizados com o auxílio da solução ótima do CPLEX®, passando a percorrer 136,65 Km por dia. A redução anual é de 160 Km, o equivalente a R\$ 130,18 de economia com combustível, além da redução da emissão dos gases de efeito estufa.

Também foi possível realizar a adaptação do problema do caixeiro viajante assimétrico proposto por Arenales *et al.* (2015), sendo aplicado dentro do contexto de transporte universitário. Essa adaptação traz uma alternativa além do ciclo hamiltoniano, transformando o problema inicial em dois subproblemas, ou seja, as rotas de ida e volta, buscando a otimização.

Os resultados apresentados para este problema são de baixo impacto quando analisados apenas na rota estudada, mas podem ser levados para as outras rotas realizadas por este transporte em outros turnos e até mesmo ser disseminada a aplicação do problema para outros transportes da secretaria, que realizam um transporte parecido de estudantes. As reduções da quilometragem também impactam no tempo gasto que os estudantes gastam diariamente, melhorando o conforto.

Sendo assim, a limitação deste trabalho foi na análise de apenas uma rota percorrida por este transporte escolar, trazendo a oportunidade da aplicação do método para novos turnos e novos veículos com outras aplicações dentro da secretaria. Também é possível que outras empresas façam uso destes procedimentos a fim de aprimorar suas rotas de distribuição, contribuindo para a redução de custos e buscando diferenciais competitivos.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS.

Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas). Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>>. Acesso em: 27 set. 2023.

ALVES, F. S. **Problemas de roteamento de veículos aplicados no planejamento logístico do transporte escolar da cidade de Coxim-MS**. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2015.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; NORABITO, YANASSE, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

BARBOSA, W. R. **Aplicação da Pesquisa Operacional Como Solução de Problemas em Operações de Logística do E-commerce: Uma Revisão Sistemática de Literatura**. In: ENEGEP - O Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 40, 2020, Foz do Iguaçu, Anais, Foz do Iguaçu, Abepro 2020. Disponível em: <https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_ST_384_1900_43834.pdf> Acesso em: 29 set. 2023.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 dez. 1996.

COLIN, E. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional.** 9. ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2013.

PASCHOARELLI, L. C.; MEDOLA, F. O.; BONFIM, G. H. C. Características Qualitativas, Quantitativas de Abordagens Científicas: estudos de caso na subárea do Design Ergonômico. **Revista de Design, Tecnologia e Sociedade**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 65–78, 2018. Disponível em:< <https://periodicos.unb.br/index.php/design-tecnologia-sociedade/article/view/15699>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional: uma visão geral.** 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

LONGARAY, A. A. **Introdução à Pesquisa Operacional.** Editora Saraiva, 2013. 9788502210844.

The Operational Research Society, 2021. Disponível em:< <https://www.theorsociety.com/about-or/>>. Acesso em: 03 mar. 2022.