

PLANEJAMENTO DE ROTAS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA TRANSPORTADORA DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE LONDRINA-PR

Jair da Silva (UFPR - Jandaia do Sul) E-mail: jairsilva@ufpr.br
Vinícius Henrique de Oliveira (UFPR) E-mail: vini28498@gmail.com
Janete de Paula Ferrareze Silva (UFPR - Jandaia do Sul) E-mail: jpfmat@gmail.com
Juliana Verga Shirabayashi (UFPR - Jandaia do Sul) E-mail: juverga@gmail.com

Resumo: Devido ao aumento da competitividade, as inovações tecnológicas têm desempenhado um papel de protagonismo nas melhorias dos processos de produção em qualquer empresa. Não importa o tamanho, seja uma micro, pequena ou grande, todas sentem uma necessidade de projetos que visem a minimização dos custos relacionados ao transporte de insumos e de mercadorias. Dentre as ferramentas que simulam cenários de melhorias de processos está a Pesquisa Operacional, e dentro desta temos um modelo de planejamento de rotas, também conhecido como o Problema do Caixeiro Viajante. Neste problema, necessariamente deve-se sair de um ponto de partida, percorrer uma série de locais apenas uma vez e, então, retornar ao ponto de partida visando percorrer o menor percurso ou o menor tempo. O presente trabalho faz um estudo de caso em uma transportadora de implementos agrícolas localizada na região metropolitana de Londrina – PR, que a mais de 11 anos atua no mercado de transporte de máquinas e componentes agrícolas. Para o planejamento das rotas foi construído um modelo do Problema do Caixeiro Viajante na linguagem de programação Python e utilizado o solver IBM-CPLEX para resolvê-lo. Os dados fornecidos pela empresa correspondem a três roteiros que correspondem a grande parte do território nacional. Com a aplicação dos dados no modelo e resolvendo via IBM-CPLEX foi possível atingir cerca de 19,79% de redução na distância total percorrida, considerando os cinco roteiros, e obter aproximadamente R \$6360,79 de redução no custeio do transporte.

Palavras-chave: Pesquisa operacional, Problema do Caixeiro Viajante, IBM-CPLEX, Python.

Abstract: Due to increased competitiveness, technological innovations have played a leading role in improving production processes in any company. Regardless of size, whether micro, small, or large, all feel the need for projects aimed at minimizing costs related to the transportation of inputs and goods. Among the tools that simulate process improvement scenarios is Operations Research, and within it, we have a route planning model, also known as the Traveling Salesman Problem. In this problem, it is necessary to start from a starting point, visit a series of locations only once, and then return to the starting point, aiming to cover the shortest distance or the shortest time. This paper presents a case study in an agricultural implement carrier located in the metropolitan region of Londrina, Paraná, which has been operating in the market for the transport of agricultural machines and components for over 11 years. For route planning, a Traveling Salesman Problem model was constructed in the Python programming language, and the IBM-CPLEX solver was used to solve it. The data provided by the company corresponds to five routes that cover most of the national territory. By applying the data to the model and solving it via IBM-CPLEX, it was possible to achieve a reduction of approximately 19.79% in the total distance traveled, considering the three routes, and obtain approximately R\$6,360.79 in transportation cost reduction.

Keywords: Operations Research, Traveling Salesman Problem, IBM-CPLEX, Python.

1. Introdução

Segundo estimativa do Instituto de Logística e Supply Chain (ILOS) o custo logístico no Brasil ficou em 13,7% do PIB em 2022, este fato foi apresentado na 28ª edição do Fórum ILOS realizado em outubro de 2022 na cidade de São Paulo (Jornal do Comércio, 2022). Ainda de acordo com o ILOS o custo logístico no Brasil ficou em

12,6% em 2020 e 12,3% em 2017, no entanto, em países desenvolvidos como os Estados Unidos esse custo cai pela metade ficando em torno de 6% a 7% (Associação Brasileira de Operadores Logísticos, 2022). Assim, o custo logístico no Brasil tem um peso considerável no custo final de um produto em uma empresa, somado a este ambiente logístico desafiador, as organizações naturalmente vivem em um cenário de competitividade, o que faz com que busquem constantemente mudanças no seu setor logístico para conseguir uma eficiência que possa trazer um diferencial competitivo. Para Christopher (1997), esta redução nos custos de transportes nas empresas deve vir em conjunto com uma estratégia competitiva que agregue valor monetário, assim como metas de crescimento e inovação tecnológicas. Uma das ferramentas que ajuda na gestão de recursos possibilitando seus gestores fazerem várias simulações de cenários antes de tomar a decisão mais assertiva é a Pesquisa Operacional (PO). De acordo com Hillier e Lieberman (2010) e Arenales et al (2006), a PO é uma aplicação do método científico a problemas complexos, a fim de ajudar na tomada de decisões. Envoltos no ambiente da PO tem-se o modelo de planejamento de rotas, também conhecido como Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Este é um dos problemas de otimização combinatória mais estudados Laporte (1992), atraindo diversos pesquisadores de inúmeras áreas, devido sua diversificada possibilidade de aplicações (REINELT, 2001).

Neste trabalho o PCV é utilizado para fazer o planejamento de rotas em uma empresa de transporte de implementos agrícolas localizada na região metropolitana de Londrina – PR, que a mais de 11 anos atua no mercado de transporte de máquinas e componentes agrícolas, como tratores, colheitadeiras, plantadeiras, pulverizadores e implementos em geral e atendem em sua maioria os estados do Mato Grosso do Sul, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Paraná. A empresa em questão é de pequeno porte, não possui sistema de geração de rotas otimizadas e o estudo visa apresentar para os gestores os benefícios de realizar o planejamento de rotas de maneira otimizada. Para construção das rotas otimizadas foi escrito um modelo do PCV na linguagem Python e em seguida resolvido via o solver IBM-CPLEX (2009) em conjunto com o Python.

2. Modelagem do problema

O PCV é um problema clássico de otimização combinatória, devido a sua diversidade de aplicações este problema atraiu pesquisadores de diversas áreas, mesmo nos dias atuais as pesquisas nesta linha contínua bem ativas, Ha, Q.M. et al (2020), Fachini, R.F., Armentano, V.A (2020) e (LIU Y. ET AL., 2021). O PCV pode ser definido da seguinte maneira. Considere $queG = (L; A)$ representa um grafo, onde $L = (0, 1, \dots, N)$ são os vértices do grafo e A é um conjunto de arcos. Do ponto de vista do problema que estamos tratando, L representa o conjunto de cidades e A representa as rodovias. Em Carvalho, (2007) está descrita a modelagem que usamos:

$$\text{Min} \sum_{i=0, j=0}^N c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Restrições

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

$$\sum_{j=i}^N x_{ij} = 1, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij} \leq |S|, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i, j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Na equação (1) está descrito o objetivo do problema que é minimizar os custos envolvidos, no problema em questão o custo é a minimização da distância percorrida. As equações (2) e a (3) garantem que todas as cidades são visitadas uma única vez. A equação (4) garante que não há sub-rotas e a (5) mostra que o modelo é binário e não negativo.

3. Metodologia de solução

O PCV e suas variantes tem em sua essência uma complexidade exponencial de solução dada sua natureza combinatória. No problema em questão isso se traduz que temos muitas rotas factíveis e a busca pela melhor rota tem um custo computacional alto. Por isso, para resolução do PCV e planejamento das rotas adotamos uma metodologia de solução que faz uso do consagrado solver IBM-CPLEX (2009) em conjunto com a linguagem de programação Python. Primeiro construímos o modelo matemático do PCV na linguagem Python e em seguida utilizamos o solver IBM-CPLEX (2009) para a resolução.

3.1 Linguagem de programação Python.

O programador holandês Guido van Rossum foi o criador da linguagem de programação Python no início dos anos 90. Esta linguagem de programação foi criada para ser fácil de aprender e usar. Algumas das características que norteiam o seu desenvolvimento são: clareza é melhor do que a obscuridade, explícito é melhor do que implícito, simplicidade é melhor do que complexidade, belo é melhor do que feio, legibilidade é importante (PYTHON BRASIL, 2008). Sua aplicabilidade é muito ampla e de fácil compreensão, contempla diversas áreas do desenvolvimento de software, gerenciamento de banco de dados, criação de interface gráfica e multimídia. Por se tratar de um ambiente livre e de código aberto, a linguagem acabou se tornando muito utilizada em universidades para projetos científicos e também como um modelo para o aprendizado de programação. No ano de 2021, a linguagem de programação Python ficou em primeiro lugar no ranking publicado pela revista IEEE Spectrum (2020) que é uma revista de tecnologia que publica um ranking anual de linguagens de programação.

3.2 Solver IBM-ILOG-CPLEX

O IBM-CPLEX (2009) é um software desenvolvido pela IBM para atuar como uma ferramenta de otimização matemática. É capaz de resolver problemas de Programação Linear, Programação Mista e Quadrática. Esta tecnologia permite a otimização de decisões para melhorar a eficiência de processos, assim como reduzir custos e aumentar a lucratividade. O IBM-CPLEX (2009) contém uma aplicabilidade gigantesca, é capaz de fazer integrações com diversas linguagens de programação, ou também pode-se utilizar a própria interface gráfica do CPLEX desenvolvida pela IBM.

1	Rolândia	Guaravera	Manoel Ribas
2	Arapongas	Floresta	Guarapuava
3	Amambaí	Campo Mourão	Pato Branco
4	Aral Moreira	Ivatuba	Palmitos
5	Ponta Porã	Doutor Camargo	Doutor Maurício Cardoso
6	Dourados	Rolândia	Passo Fundo
7	Marechal Cândido Rondon	Cambé	Lagoa Vermelha
8	Floresta	Londrina	Barracão
9	Londrina		Luzerna
10			Palmeira
11			Ponta Grossa
12			Ortigueira
13			Londrina

Fonte: Os Autores (2023)

Na Figura 1 - Romaneio de cargas temos “KM INICIAL” e “KM FINAL” que o motorista preenche, assim pode-se calcular a quilometragem total para cada roteiro. Na TABELA 3 tem-se a quantidade total percorrida por cada roteiro.

Tabela 2 – Distância percorrida pelo *motorista*

Roteiro 1	Roteiro 2	Roteiro 3
1770 km	540 km	2854 km

Fonte: Os Autores (2023)

4.2 Novo planejamento das rotas

Para o planejamento das novas rotas foi construído o modelo matemático do PCV na linguagem Python e em seguida o problema foi resolvido via solver IBM-CPLEX (2009) conectado à linguagem Python.

A Tabela 3 - Resultados finais de redução apresenta os resultados finais de redução da distância total percorrida.

Tabela 3 – Resultados finais de redução

Roteiros	Atual	Nova Rota	Redução
Roteiro 1	1770 km	1494 km	15,6%
Roteiro 2	540 km	479 km	11,3%
Roteiro 3	2854 km	2169 km	24%

Fonte: Os Autores (2023)

Na Figura 2, tem-se a rota atual versus a rota planejada do roteiro 1 em forma de figura.

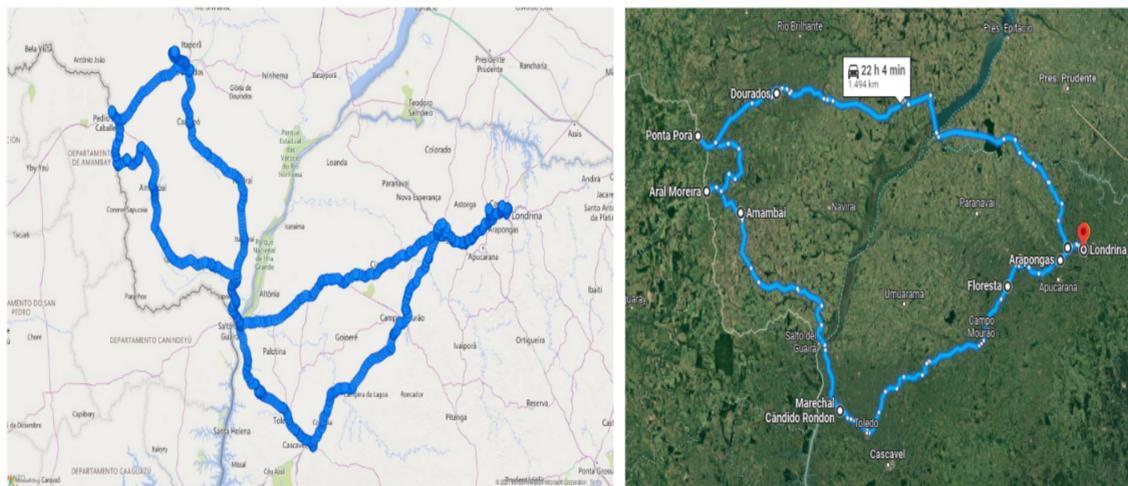


Figura 2 – rota atual vs rota planejada do roteiro 1.

A rota planejada é dada pela sequência de cidades 0-1-2-8-7-3-4-5-6-0, com uma redução de 15,6% na distância percorrida.

Na Figura 3, apresenta-se a rota atual versus a rota planejada do roteiro 2 em forma de figura.

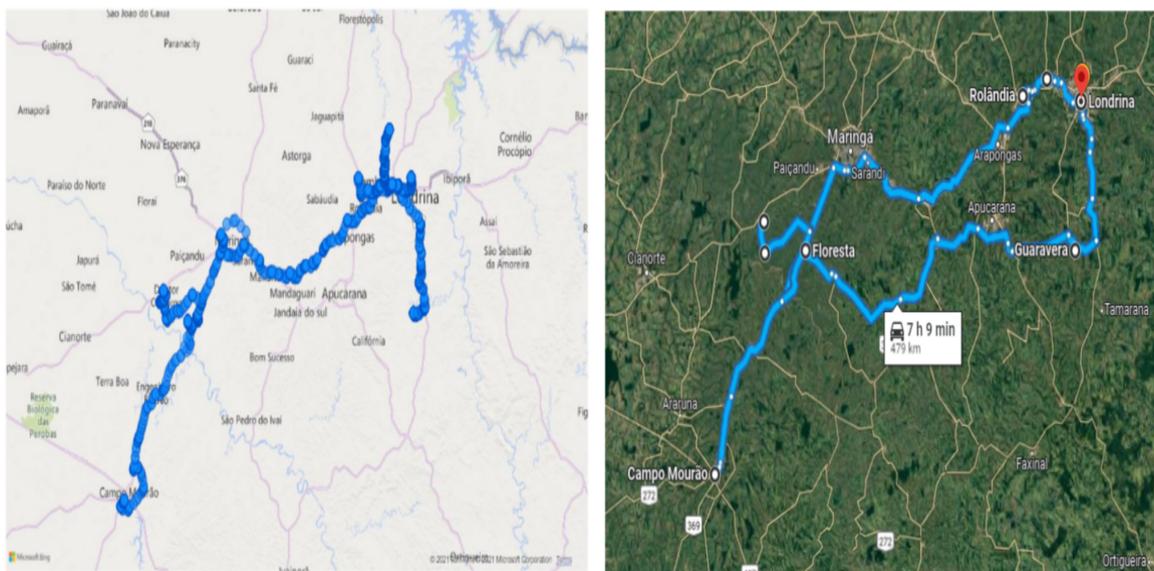


Figura 3 – rota atual vs rota planejada do roteiro 2.

A rota planejada é dada pela sequência de cidades 0-7-6-3-5-4-2-1-0, com uma redução de 11,3% na distância percorrida.

Na Figura 4, tem-se a rota atual versus a rota planejada do roteiro 3 em forma de figura.

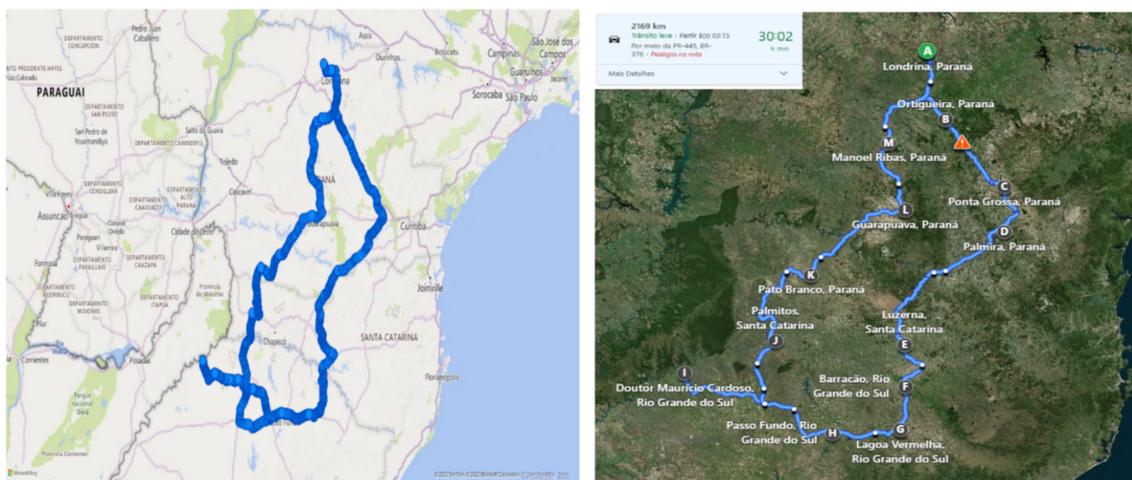


Figura 2 – rota atual vs rota planejada do roteiro 3.

A rota planejada é dada pela sequência de cidades 0-12-11-10-9-8-7-6-5-4-3-2-1-0, com uma redução de 24% na distância percorrida.

De maneira geral as rotas planejadas apresentam um bom desempenho quando comparadas com as rotas atuais.

Nosso próximo objetivo foi conversar com o gestor da empresa e encontrar uma estimativa de redução monetária. Em conversa com o gestor da empresa foi definido que os principais fatores que afetam o custo de transporte são, o valor do combustível, pedágio nas rodovias, a manutenção do veículo e custos operacionais. Retirando o pedágio nas rodovias, os outros fatores estão diretamente relacionados a distância percorrida, visto que, quanto maior a distância percorrida, maior é o gasto com combustível, com custeio operacional e com manutenção do veículo. Assim, pode-se concluir que a redução monetária em porcentagem é igual a redução em porcentagem obtida na quilometragem em cada rota, se retirarmos o fator pedágio nas rodovias. De acordo com o romaneio referenciado na Figura 1, o gestor de frotas também anota o valor do frete de entrega. Por meio deste dado foi possível coletar o custo para cada roteiro, retirando o valor do pedágio.

Na Tabela 4, está representado os valores de redução comparado com os valores atuais utilizados pela empresa na moeda nacional.

Tabela 4 – Redução no custeio de transporte por roteiro.

Roteiros	Atual	Planejado
Roteiro 1	R\$ 10.462,16	R\$ 8.830,05
Roteiro 2	R\$ 3.191,84	R\$ 2.831,16
Roteiro 3	R\$ 18.200,00	R\$ 13.832,00

Fonte: Os Autores (2023)

Na Tabela 5, é apresentada uma redução média levando em consideração os três romaneios.

Tabela 5 – Pesquisa qualitativa *versus* pesquisa quantitativa.

Atual	Planejado	Redução(%)
R\$ 31.854,00	25.493,21	19,96%
Fonte: Os Autores (2023)		

A redução monetária média ficou em 19,96%. Para que a empresa possa atingir esses resultados, seria necessário que o gestor de frotas alterasse seu modo de análise, ou seja, utilizaria o resultado do algoritmo para fazer o roteiro a ser percorrido e repassar a informação para o motorista responsável pela viagem. O algoritmo seria o método de análise que o gestor utilizaria para tomar a melhor decisão, impactando diretamente no planejamento de rotas da transportadora.

5. Considerações finais

Neste trabalho foi proposto um estudo de caso para planejamento de rotas em uma empresa de Transporte de Implementos Agrícolas. Para o planejamento das novas rotas foram necessários a construção de um modelo matemático de planejamento de rotas na linguagem de programação Python e em seguida este modelo foi resolvido através do solver (CPLEX-IBM, 2009) . A empresa forneceu três roteiros, em um destes roteiros as cidades são do estado do Paraná e em dois dos roteiros é interestadual. A empresa em questão é uma empresa de pequeno-médio porte familiar assim está sempre em busca de otimizar seus recursos monetários que geralmente são escassos. Nessa empresa seu produto é o transporte, assim um dos fatores que mais impacta no custo do seu produto é o combustível, portanto uma redução no consumo de combustível por roteiro tem um impacto direto no lucro da empresa.

Ao analisar os três roteiros podemos perceber que o uso de ferramentas de otimização de rotas faz sentido para o gestor de rotas de uma empresa de transporte. No roteiro um, o percurso total realizado pela empresa foi de 1770 km e após o planejamento da rota esse valor foi de 1494 km, uma redução de 15,6%. No roteiro dois, o percurso da empresa foi de 540 km e após o planejamento da rota foi de 479 km, uma redução de 11,3%. No último e maior roteiro o percurso realizado pela empresa foi de 2854 km e depois de otimizar a rota o percurso foi de 2169 km, obtendo a maior redução que ficou em 24%. Também foi realizada uma análise monetária de redução de custos para a empresa nos três roteiros, que ficou na ordem de 19,96%.

Apesar desse estudo ser inicial e exploratório, pode-se concluir que o uso de software de planejamento de rotas para esta empresa de Transporte de Implementos Agrícolas pode trazer um ganho de produtividade de curto prazo, o que pode ser um diferencial frente aos seus concorrentes.

Referências

- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. & YANASSE, H.** Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2006
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE OPERADORES LOGÍSTICOS.** Custo Brasil do setor logístico deve consumir 13,3% do PIB em 2022. Website, setembro 2022. Disponível em <https://abolbrasil.org.br/noticias/noticias-do-setor/custo-brasil-do-setor-logistico-deve-consumir-133-do-pib-em-2022>. Acesso em 12 maio 2023.
- CARVALHO, M. B.** Aplicações de meta-heurística genética e fuzzy no sistema de colônia de formigas para o problema do caixeiro viajante. 78p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2007.
- CHRISTOPHER, M.** Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. Tradução Francisco Roque Monteiro Leite; revisão técnica Carlos Eduardo Nobre. São Paulo: Pioneira, 1997.
- FACHINI, R.F. & ARMENTANO, V.A.** Exact and heuristic dynamic programming algorithms for the traveling salesman problem with flexible time windows. *Optim Lett* 14, 579–609 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11590-018-1342-y>
- HA, Q.M., DEVILLE, Y., PHAM, Q.D. ET AL.** A hybrid genetic algorithm for the traveling salesman problem with drone. *J Heuristics* 26, 219–247 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10732-019-09431-y>
- HILLIER, F. S. & LIEBERMAN, G. J.** Introdução à pesquisa operacional. Porto Alegre: LTC Editora, 2010.
- IBM-CPLEX, I.I.**, 2009. V12. 1: User's Manual for IBM-CPLEX. International Business Machines Corporation, 46(53), p.157.
- IEEE SPECTRUM.** Top Programming Languages 2020. Website, julho de 2022. Disponível em <https://spectrum.ieee.org/top-programming-language-2020>. Acesso em 12 maio 2023.
- JORNAL DO COMÉRCIO.** Combustíveis: Custo logístico chega a 13,7% do PIB impactado pelo aumento do diesel e representa entrave. Website, outubro de 2022. Disponível em <https://www.jornaldocomercio.com/cadernos/jc-logistica/2022/10/869541-custo-logistico-chega-a-137-do-pib-impactado-pelo-aumento-do-diesel-e-representa-entrave.html>. Acesso em 12 maio 2023.
- LAPORTE, G. THE VEHICLE ROUTING PROBLEM:** An overview of exact and approximate algorithms, *European Journal of Operational Research*, Volume 59, Issue 3, Pages 345-358, 1992.
- LIU Y., ET AL.**, "Multi-Modal Multi-Objective Traveling Salesman Problem and its Evolutionary Optimizer," 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Melbourne, Australia, 2021, pp. 770-777, doi: 10.1109/SMC52423.2021.9658818.
- PYTHON BRASIL.** The Zen of Python. Website, setembro de 2008. Disponível em <https://wiki.python.org.br/TheZenOfPython>. Acesso em 12 maio 2023.
- REINELT, G.** The Traveling Salesman: Computational Solutions for the Applications. Lectures Notes in Computer Science 840, Springer-Verlag, Berlin, 1994.