

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINÍCIUS HENRIQUE DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA O PLANEJAMENTO DE ROTAS
DE UMA TRANSPORTADORA DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS

JANDAIA DO SUL

2022

VINÍCIUS HENRIQUE DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DE MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA O PLANEJAMENTO DE ROTAS
DE UMA TRANSPORTADORA DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS

Monografia apresentado ao curso de Engenharia de Produção, campus de Jandaia do Sul, da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Jair da Silva.

JANDAIA DO SUL

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA JANDAIA DO SUL

Oliveira, Vinicius Henrique de

Aplicação de métodos heurísticos para o planejamento de rotas de uma transportadora de implementos agrícolas. / Vinicius Henrique de Oliveira. – Jandaia do Sul, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Jandaia do Sul, Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Jair da Silva.

1. Programação linear. 2. Pesquisa operacional. 3. Problema do Caixeiro Viajante. 4. Soluções heurísticas. I. Silva, Jair da. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD: 658.4



PARECER N° UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PARECER 59 - VINÍCIUS HENRIQUE DE OLIVEIRA/2022/UFPR/R/JA
PROCESSO N° 23075.079917/2019-87
INTERESSADO: VINICIUS HENRIQUE DE OLIVEIRA

**TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO**

**Título: APLICAÇÃO DE MÉTODOS HEURÍSTICOS PARA O PLANEJAMENTO DE ROTAS DE
UMA TRANSPORTADORA DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS.**

Autor(a): VINÍCIUS HENRIQUE DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau no curso de Engenharia de Produção, aprovado pela seguinte banca examinadora.

Jair da Silva (Orientador)

Rafael Germano Dal Molin Filho

Janete de Paula Ferrareze



Documento assinado eletronicamente por **JAIR DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/05/2022, às 14:13, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JANETE DE PAULA FERRAREZE SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/05/2022, às 14:14, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **RAFAEL GERMANO DAL MOLIN FILHO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/05/2022, às 14:18, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4543138** e o código CRC **6FC41696**.

Ao meu avô Luiz José de Oliveira (Im memoriam)
Minha maior inspiração de trabalho e dedicação.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por ter me sustentado durante todos estes anos de trabalho e estudos desenvolvidos na Universidade Federal do Paraná.

Aos meus pais Elias José de Oliveira e Andreia Cristina Rodrigues Oliveira, dois grandes profissionais da educação, que me trouxeram muito conhecimento não só acadêmico, mas uma educação exemplar para enfrentar os desafios deste mundo e por todo o sustento financeiro que me trouxeram durante os quatro anos e meio que pude residir na cidade de Jandaia do Sul – PR.

A minha futura noiva Giovanna Lyssa, pela paciência por me aturar durante todo este tempo e por estar em meu lado em todas as minhas decisões, sendo minha mediadora nos principais desafios enfrentados durante a graduação.

A meu orientador, Prof. Dr. Jair da Silva, pelo empenho investido a mim, pelo tempo disponibilizado e principalmente pela contribuição para este projeto de pesquisa. À minha orientadora de monitoria de Matemática, Prof. Dr. Janete Ferrareze pela contribuição em minha carreira acadêmica na área da educação.

À toda a equipe de professores e coordenadores da Universidade pelos ensinamentos, pela troca de conhecimento e incentivos à minha carreira profissional.

À Universidade Federal do Paraná pelos recursos disponibilizados, pelos profissionais das diversas áreas que me auxiliaram em vários quesitos estudantis.

Gostaria também de destacar alguns nomes de pessoas que eu tive o privilégio de conhecer durante a graduação, que diretamente contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal, exemplos de pessoas que marcaram minha trajetória de vida, nomes como: Leonardo Viana, Lincoln Amstalden, Matheus Trianoski, João Victor Pereira, Lucas Trianoski, Leonardo Moreli, Mateus Freitas e Gabriel Santos.

“Se fiz descobertas valiosas, foi mais por ter persistência do que qualquer
outro talento”

Frase de Isaac Newton

RESUMO

Atualmente, as inovações tecnológicas têm proporcionado uma série de oportunidades visando melhorias nos processos das empresas, trazendo para o universo empresarial um aumento de competitividade em relação aos seus meios de produção. Pode-se afirmar que este quesito se tornou uma necessidade para as empresas, principalmente as de pequeno porte e, assim, tem-se a importância das pesquisas que envolvem projetos que visem a minimização dos custos relacionados a transporte de insumos e de mercadorias. Existem estudos eficientes visando tais reduções, tal como o Problema do Caixeiro Viajante, que se enquadra para a maioria das empresas de transporte. 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. A presente pesquisa científica tem como objetivo calcular a rota mais viável a prosseguir, de modo a gerar uma redução no custo de transporte, no tempo de viagem e melhoria na satisfação de seus clientes. Por esta razão foi estudada a heurística do Problema do Caixeiro Viajante, por meio de uma revisão teórica abordando temas como: logística, pesquisa operacional, programação linear e métodos de soluções heurísticas. Além da revisão teórica, foi abordada também a análise de uma programação de cargas de uma transportadora, desenvolvendo duas soluções heurísticas, sendo uma delas a aplicação do Problema do Caixeiro Viajante através do 2-opt, foco desta pesquisa, e outra a utilização do método do vizinho mais próximo, a fim de descrever a correlação entre ambos os resultados, denotando os pontos positivos de cada heurística, bem como os ganhos para a empresa. Ambas as soluções foram utilizadas como materiais e métodos: a linguagem de programação Python, fazendo uma interligação com o solver da IBM-CPLEX, que é o responsável por calcular as meta-heurísticas e por trazer os resultados das rotas. Portanto foram coletados dados de cinco roteiros que correspondem grande parte do território nacional. Com a aplicação do algoritmo solucionador, a presente pesquisa atingiu cerca de 15% de redução na distância total percorrida, considerando um âmbito global, e obteve-se aproximadamente R\$ 8000,00 de redução no custeio de transporte, atingindo assim seu objetivo inicial.

Palavras-chave: Programação linear, Pesquisa operacional, Problema do Caixeiro Viajante, Soluções Heurísticas.

ABSTRACT

Nowadays, technological innovation has provided a series of opportunities for improvements in the processes of companies, bringing to the business universe an increase in competitiveness relative to their means of production. It is safe to say that this matter has become a priority for companies, especially small ones, and, therefore, the importance of research projects that seek to minimize the costs of transport of raw materials and products has also increased. There are many efficient studies around such optimizations, such as the Traveling Salesman Problem, which fits in most transportation companies: a problem in which one must necessarily leave from a starting point, go through many places only once and then return to the point of departure. This scientific research aims to calculate the most viable route to pursue, in order to minimize transportation costs and travel time, while also improving customer satisfaction. In this sense, the heuristic of the Traveling Salesman Problem was studied through a theoretical review covering topics such as: logistics, operational research, linear programming and methods of heuristic solutions. In addition to this theoretical review, a practical analysis of a cargo schedule in a carrier in the region is also addressed, developing two heuristic solutions: namely the application of the Traveling Salesman Problem through 2-opt, which is the main focus of this research, and the nearest neighbor method. We later compare the results of both methods, denoting the positive points of each heuristic, as well as the gains for the company. Both solutions will be used as materials and methods: the Python programming language, making an interconnection with the IBM-CPLEX solver, which is responsible for calculating the meta-heuristics and bringing the results of the routes. Therefore, data were collected from five routes that correspond to a large part of the national territory. With the application of the solver algorithm, the present research reached about 15% of reduction in the total distance traveled, considering a global scope, and obtained approximately R\$ 8000.00 of reduction in the cost of transport, thus reaching its initial objective.

Keywords: Linear Programming, Operational Research, Traveling Salesman Problem, Heuristic Solutions.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXOS LOGÍSTICOS.....	21
FIGURA 2 – FASES DO ESTUDO DA PESQUISA OPERACIONAL.....	22
FIGURA 3 – SOLUÇÃO GRÁFICA DE UM EXEMPLO DE PL	24
FIGURA 4 – VISUALIZAÇÃO DO PONTO ÓTIMO	25
FIGURA 5 – EXEMPLO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE.....	26
FIGURA 6 – EXEMPLO DE SOLUÇÃO PARA O PCV	28
FIGURA 7 – ÁREAS DA HEURÍSTICA.....	29
FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO NEAREST NEIGHBOR.....	30
FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON.....	31
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DO SOLVER IBM-CPLEX.....	32
FIGURA 11 – ESTRUTURA DE UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA.....	34
FIGURA 12 – ROMANEIO DE CARGAS	36
FIGURA 13 – PROCESSO DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	37
FIGURA 14 – DADOS DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO.....	41
FIGURA 15 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 1	42
FIGURA 16 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 2.....	43
FIGURA 17 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 3.....	43
FIGURA 18 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 4.....	44
FIGURA 19 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 5.....	44
FIGURA 20 – VIZINHO MAIS PRÓXIMO COM 10 LOCAIS	46
FIGURA 21 – 2-OPT COM 10 LOCAIS.....	46
FIGURA 22 – VIZINHO MAIS PRÓXIMO COM 15 LOCAIS	47
FIGURA 23 – 2-OPT COM 15 LOCAIS.....	47
FIGURA 24 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DAS HEURÍSTICAS	48
FIGURA 25 – IMPORTAÇÃO DOS DADOS	50
FIGURA 26 – FUNÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO.....	50
FIGURA 27 – FUNÇÃO VIZINHO 2-OPT.....	51
FIGURA 28 – APLICAÇÃO DA BIBLIOTECA FOLIUM.....	52
FIGURA 29 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 1	53

FIGURA 30 – SOLUÇÃO DAS HEURÍSTICAS EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 1	54
FIGURA 31 – PARAMETRIZAÇÃO DO ROTEIRO 1	55
FIGURA 32 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 2	55
FIGURA 33 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA VIZINHO MAIS PRÓXIMO EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 2	56
FIGURA 34 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA 2-OPT EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 2.....	56
FIGURA 35 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO PARA O ROTEIRO 2	57
FIGURA 36 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 2-OPT PARA O ROTEIRO 2	58
FIGURA 37 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 3	58
FIGURA 38 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA VIZINHO MAIS PRÓXIMO EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 3	59
FIGURA 39 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA 2-OPT EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 3	59
FIGURA 40 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO PARA O ROTEIRO 3	60
FIGURA 41 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 2-OPT PARA O ROTEIRO 3	61
FIGURA 42 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 4	61
FIGURA 43 – SOLUÇÃO DAS HEURÍSTICAS EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 4	62
FIGURA 44 – PARAMETRIZAÇÃO DO ROTEIRO 4	63
FIGURA 45 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 5	63
FIGURA 46 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA VIZINHO MAIS PRÓXIMO EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 5	64
FIGURA 47 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA 2-OPT EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 5	64
FIGURA 48 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO PARA O ROTEIRO 5	65
FIGURA 49 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 2-OPT PARA O ROTEIRO 5	66

FIGURA 50 – CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DAS HEURÍSTICAS	68
FIGURA 51 – INDICADOR GLOBAL DOS RESULTADOS	69
FIGURA 52 – REDUÇÃO DE CUSTOS POR ROTEIRO	71
FIGURA 53 – INDICADOR GLOBAL DA REDUÇÃO DE CUSTOS DE TRANSPORTE.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – SIMULAÇÃO PROBLEMA DO ASTRONAUTA.....	28
TABELA 2 – ROTEIRIZAÇÃO DA EMPRESA	39
TABELA 3 – DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO MOTORISTA.....	40
TABELA 4 – TEMPO GASTO PELO MOTORISTA EM VIAGEM	40
TABELA 5 – RESULTADO DAS HEURÍSTICAS PARA O ALGORITMO INTERMEDIÁRIO.....	48
TABELA 6 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 1	54
TABELA 7 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 2.....	57
TABELA 8 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 3.....	60
TABELA 9 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 4.....	62
TABELA 10 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 5.....	65
TABELA 11 – RESULTADO DAS HEURÍSTICAS	66
TABELA 12 – RESULTADOS FINAIS DE REDUÇÃO	67
TABELA 13 – CUSTEIO DE TRANSPORTE POR ROTEIRO	70
TABELA 14 – REDUÇÃO NO CUSTEIO DE TRANSPORTE POR ROTEIRO	71
TABELA 15 – REDUÇÃO TOTAL	72

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

PCV	- Problema do Caixeiro Viajante.
PO	- Pesquisa Operacional.
TSP	- <i>Traveling Salesman Problem</i> .
PL	- <i>Programação linear</i> .

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 LOGÍSTICA	20
2.2 PESQUISA OPERACIONAL	22
2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR	23
2.3.1 <i>Formulação matemática da programação linear</i>	23
2.4 TRAVELING SALESMAN PROBLEM	26
2.4.1 <i>Formulação matemática do TSP</i>	27
2.5 MÉTODOS HEURÍSTICOS	29
2.5.1 Nearest neighbor heuristic	30
2.5.2 K-opt	30
2.6 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON	31
2.7 SOLVER CPLEX	32
3 ABORDAGEM METODOLÓGICA	33
3.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA	34
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA	34
3.2.1 O cenário atual da empresa.	35
3.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS	36
4 DESENVOLVIMENTO	38
4.1 DADOS DE ROTEIRIZAÇÃO DA EMPRESA.	38
4.1.1 Gráfico de roteirização.	41
4.2 O ALGORITMO INTERMEDIÁRIO	45
4.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO FINAL	49
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.	52
4.4.1 Roteiro 1	53

4.4.2 Roteiro 2.....	55
4.4.3 Roteiro 3.....	58
4.4.4 Roteiro 4.....	61
4.4.5 Roteiro 5.....	63
4.5 ANÁLISE DOS INDICADORES E DISCUSSÕES FINAIS	66
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5 CONCLUSÃO	75
5.1 TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

As empresas nos tempos atuais, com o grande mix de produtos e alta demanda de transporte dos insumos e componentes necessários para a sua fabricação carecem amplamente de estarem engajadas em constantes mudanças em seu cenário logístico, para que possam ter uma redução em seu custeio de transporte.

O cenário pandêmico na qual o mundo tem passado, conduziu a um grande aumento no preço do combustível nas refinarias. A cada dia, trabalhar com o transporte tem se tornado mais difícil. Um dos motivos para a alta do combustível foi um acordo entre os principais produtores de petróleo do mundo, quando restringiram a produção durante a pandemia justamente para equilibrar o preço, visto que a demanda estava mais baixa por conta do isolamento social (G1, 2021).

Considerando uma empresa que é responsável pela sua própria entrega de produtos, ou seja, todo o custeio que envolve o deslocamento de seus veículos até o cliente final é de total responsabilidade da empresa, ao fim de uma viagem traz um valor alto referente a todo este processo de expedição.

Devido a esta circunstância muitas empresas têm apostado em pesquisas na área logística com o objetivo de se manterem competitivas no mercado, aumentando a sua eficiência operacional e contribuindo para sua lucratividade empresarial.

Para Christopher (1997) não basta apenas reduzir os custos de transporte nas empresas, mas deve-se haver uma estratégia competitiva que agregue valor monetário, assim como traçar metas de crescimento e inovação tecnológica, visando a garantia de uma sobrevivência imediata.

Por esse motivo a pesquisa contém como principal intuito, simular um modelo de otimização linear através de um método heurístico visando a minimização do custo de transporte de uma transportadora da cidade de Londrina, através de estudos do problema do caixeiro viajante, somado a um levantamento de dados utilizado para verificação das principais rotas a serem otimizadas e os principais gargalos que as mesmas contém em seu âmbito de atividade.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT), o transporte rodoviário de insumos e produtos é um dos fatores mais custosos para as empresas. Apenas neste ano ocorreu um aumento acumulado de aproximadamente 27,5% no preço do combustível, segundo dados do IBGE. Há vários fatores que influenciam no aumento do combustível nas refinarias, sendo os principais o aumento da moeda americana, a baixa produção das petroleiras e o aumento dos impostos estatais. Diante disto a Petrobras sobe seu valor de mercado e a partir daí, ocorre o que chamamos de efeito dominó, onde o consumidor final acaba pagando um valor ainda mais alto pelo combustível.

O foco dessa pesquisa está concentrado no processo de roteamento de uma transportadora de implementos agrícolas, uma empresa de médio porte localizada na cidade de Londrina/PR, o qual possui como principal impasse a padronização de suas rotas de viagem, ou seja, reorganizar seus roteiros e garantir a melhor utilização de seus caminhões. Diante disso, a ideia central desse trabalho é trazer para o gestor de frotas que existem métodos de otimização que podem designar as melhores rotas de transporte que resultam no menor custeio para a empresa, respondendo uma questão impregnada na mente de um gestor: Qual é o melhor roteiro a ser percorrido, de modo a reduzir o tempo de viagem e a distância total?

1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

Os objetivos desta monografia estão divididos a seguir em objetivo geral e objetivos específicos, além de sua justificativa.

1.2.1 Objetivo geral

Diante da problemática apresentada, tem-se que o objetivo geral deste projeto é elaborar o melhor roteiro de viagem de uma transportadora de implementos agrícolas, de modo a reduzir o tempo de deslocamento de todos os locais abordados e a distância total referente às entregas situadas em seu roteamento de carga.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão descritos a seguir:

- a) Desenvolvimento do algoritmo otimizador de rotas através das ferramentas e métodos computacionais;
- b) Identificar os principais problemas relacionados a gestão de frotas da empresa;
- c) Realizar o levantamento dos dados de transporte com as coordenadas geográficas de cada local a ser visitado;
- d) Calcular as possíveis rotas otimizadas através do algoritmo solucionador IBM-CPLEX;
- e) Fazer uma análise da parametrização das rotas, para que seja apresentado à empresa uma proposta de melhoria no planejamento de seus romaneios de cargas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente pode-se observar o quanto tem aumentado a quantidade de produtos a serem transportados em nosso país, e isto não é apenas por conta da pandemia causada pela Covid-19. A cada dia que passa, consumidores tendem a fazer suas compras de forma remota e esperar que seu produto chegue até sua casa. Através de estudos realizados pela Associação Brasileira de Comércio Eletrônico, em 2020, um balanço das vendas online registrou um aumento de aproximadamente 68%, o comércio eletrônico vem crescendo no Brasil nestes últimos 10 anos, independentemente da crise econômica que o país tem enfrentado. Por conta disto, a cada venda realizada, surge uma necessidade de transporte até o local do consumidor e o principal fator que contribui para a garantir a eficiência e a qualidade do transporte é o tempo.

A utilização de programas computacionais voltados para o planejamento de rotas de viagem é muito baixa. Em sua maioria, tais rotas são planejadas através da experiência do condutor e do gestor de frotas. O uso de sistemas de otimização visando a qualidade do serviço prestado por uma transportadora, pode minimizar o tempo de percurso e garantir uma redução de custos envolvendo a manutenção dos

veículos, custos de operação em geral e resultando em uma entrega eficiente visando o prazo do cliente.

Partindo desse pressuposto, pode-se enfatizar que a realização de um trabalho acadêmico, pode trazer grandes resultados para uma empresa de pequeno porte, empresa no qual será o alvo desta pesquisa. Todavia, empresas deste ramo são carentes de métodos digitais que possam auxiliá-los em tomadas de decisões em médio e curto prazo, uma forma de conter o máximo possível de assertividade em seu planejamento, considerando também a oportunidade de o representante da empresa adquirir um certo conhecimento sobre pesquisa operacional.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo traz os conceitos e métodos de resolução utilizados na abordagem do Problema do Caixeiro Viajante, através de uma breve introdução teórica de diversos temas recorrentes, como por exemplo: Logística, Pesquisa Operacional, Programação Linear, Traveling Salesman Problem, Métodos Heurísticos, Linguagem de Programação Python e Solver CPLEX.

2.1 LOGÍSTICA

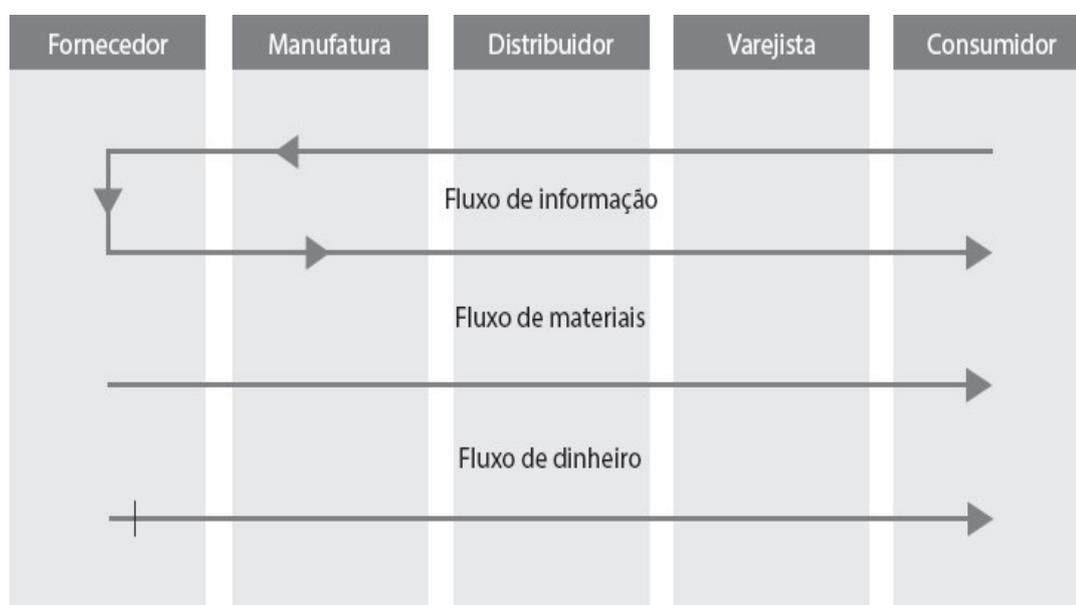
O termo logístico teve maior influência após a Segunda Guerra Mundial, naquele momento a economia necessitava de um grande volume de produtos para se restabelecer economicamente. As indústrias estavam produzindo a todo vapor e por isso dependiam de insumos advindos de fornecedores de vários locais do mundo. Assim, surgiu a necessidade de uma ferramenta que satisfizesse a necessidade das empresas por conta da alta demanda exigida. Foi quando empresas como: Bosch, GE e Westinghouse Electric Company desenvolveram um sistema que revolucionou a gestão da maioria das empresas de manufatura e de transformação de matéria-prima. O mundo vivia uma velocidade muito grande de oferta e volume produtivo e assim o MRP (Material Resources Planning) trouxe para a época uma visão estratégica em questões de planejamento de materiais e de insumo. Com o passar dos anos o mercado foi se tornando mais competitivo, o gerenciamento dos materiais já não resolvia mais os problemas pertinentes ao estoque, dessa forma houve uma abertura para estudos de gestão da cadeia dos suprimentos, criação de metodologias e sistemas como Just in time e posteriormente o MPR II (MATTOS, 2017).

Após estes estudos e acontecimentos revolucionários, a logística deixou de ser um ramo da ciência militar consolidada na própria Segunda Guerra Mundial - como uma prática de transporte de pessoas, materiais e instalações - e iniciou uma nova etapa descrita como Logística Empresarial. O *Council of Logistics Management (CLM)* foi um dos principais pilares para o estudo logístico da época. Uma organização de gestores, educadores e profissionais da área, com o intuito de incentivar o ensino e pesquisa do ramo. Uma representação sucinta desenvolvida pela CLM define que “A logística é um processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e

eficaz de mercadorias, desde o ponto de origem até o ponto de consumo” (BALLOU, 2007).

Segundo Novaes (2022) o fator principal que envolve a armazenagem de matéria-prima, materiais, estoques intermediários e acabados são os fluxos logísticos que contemplam todo o processo de fabricação, desde os fornecedores até o consumidor final. Os fluxos logísticos podem ser caracterizados como: fluxo de materiais; fluxo de dinheiro e fluxo de informações. A presente fundamentação teórica de Novaes (2022) é representada pela FIGURA 1. Observa-se que as direções dos fluxos são distintas, ou seja, para cada fluxo logístico há um propósito diferenciado.

FIGURA 1 – FLUXOS LOGÍSTICOS



Fonte: Adaptado de Novaes (2022).

Para o fluxo de informações, primeiro há uma necessidade advinda do consumidor, e esta informação é repassada para todas as partes interessadas até chegar ao fornecedor da empresa. Logo se inicia outro fluxo logístico, desta vez tratamos do fluxo de materiais, onde a direção é inversa, o fornecedor supri a empresa do material necessitado e a empresa desenvolve o que chamamos de processo de transformação, passando pela distribuição e varejo, e chegando nas mãos do consumidor.

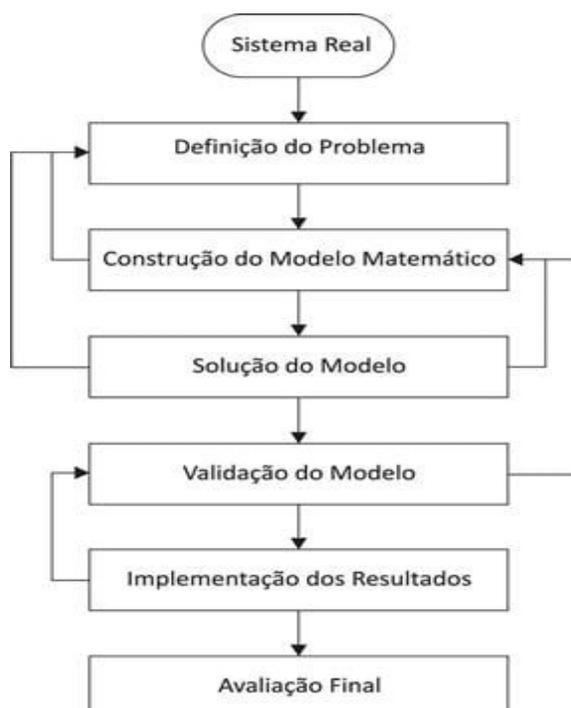
2.2 PESQUISA OPERACIONAL

Segundo Hillier e Lieberman (2013) a Pesquisa Operacional (PO) surgiu mediante os eventos posteriores à Segunda Guerra Mundial, mas desde o marco da Primeira Revolução Industrial as grandes organizações globais já necessitavam de tais técnicas visando o auxílio às tomadas de decisões. O fator principal para a evolução da PO nas empresas, foi o aumento da divisão do trabalho e a segmentação das responsabilidades gerenciais, transformando assim a principal abordagem científica para a gestão das organizações.

Longaray (2013) afirma: “A pesquisa operacional é um conjunto de técnicas que faz o uso do método científico para auxiliar as pessoas a tomarem decisões”. Formalmente pode-se considerar que a PO teve um extremo impacto na sociedade quando o assunto é a propagação do conhecimento científico mediante as organizações. Um exemplo disto, é a evolução da informática, quando anteriormente empresas de diversos ramos prescindiam de softwares especialistas de alto custo, e atualmente adotam a utilização de pacotes offices com planilhas eletrônicas.

A FIGURA 2 ilustra as fases do processo que envolve uma pesquisa de operações:

FIGURA 2 – FASES DO ESTUDO DA PESQUISA OPERACIONAL



Fonte: Adaptado de Fávero (2012).

Todo problema existente consiste em um sistema real, logo a primeira etapa da fase da pesquisa operacional pode ser categorizada como a definição do problema. A pesquisa tende a adquirir o conhecimento necessário do problema proposto, para que possa ser desenvolvido um modelo matemático, visando sanar tais dificuldades do problema. Uma vez construído o modelo, a próxima etapa consiste na solução do modelo matemático. Utiliza-se tais técnicas da PO, além de materiais e métodos que farão o trabalho de automatizar o processo de solução, como por exemplo, a utilização de métodos computacionais. Para as últimas etapas temos a validação do modelo, no qual envolve avaliar se a solução obtida atingiu a demanda do objetivo proposto anteriormente, na definição do problema. Porém, muitas vezes, é necessário fazer uma revisão das demais fases anteriores, até que as conclusões do problema sejam totalmente validadas. Esse processo é categorizado como a avaliação final da pesquisa de operações (FÁVERO, 2012).

2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A programação linear (PL) é um método de resolução de problemas que contempla relações lineares entre as variáveis dos problemas, com o objetivo de trazer uma solução viável para o problema estudado. É a principal técnica advinda da Pesquisa Operacional (PO) e sua modelagem forma um conjunto de equações lineares sendo a solução voltada para a maximização dos lucros ou minimização de recursos. Todavia a PL geralmente não é utilizada apenas para minimizar ou maximizar os itens listados, em um problema de roteirização onde necessita-se se deslocar de um ponto a outro. A função objetivo de seu problema, seria minimizar este tempo de deslocamento, ou seja, a PL pode ser utilizada em vários aspectos da PO. Sua modelagem matemática é desenvolvida através das variáveis que estão enquadradas no contexto do problema (RODRIGUES, 2014).

2.3.1 Formulação matemática da programação linear

A modelagem matemática da PL é constituída por três vertentes: variáveis de decisão, função objetivo e restrições. A formulação matemática do problema é definida conforme as equações a seguir:

$$\text{Máx (ou Mín)} \quad Z = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots + C_nX_n \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a} \quad a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \quad (2)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

Acima podemos observar os coeficientes que representam uma função objetivo de maximização (1), seguido com as restrições que satisfazem as equações do problema (2) e as condições das variáveis propostas, sendo elas condições de negatividade (3).

Uma exemplificação mais sucinta deste modelo matemático pode ser visualizada através do exemplo a seguir:

$$\text{Min } Z = 150X + 120Y$$

$$\text{Sujeito a} \quad 4x + 10y \geq 100 \quad \text{R1}$$

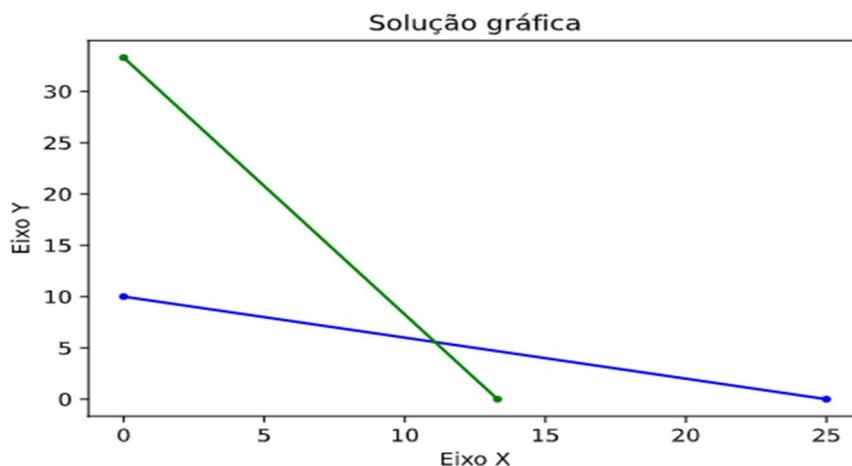
$$15x + 6y \geq 200 \quad \text{R2}$$

$$x, y \geq 0; x, y \in \mathcal{R}$$

A princípio podemos traçar uma reta que representa as restrições R1 e R2, calculando os valores quando x e y são iguais a 0.

O presente cálculo pode ser visualizado pela FIGURA 3 através do esboço de um gráfico de linhas:

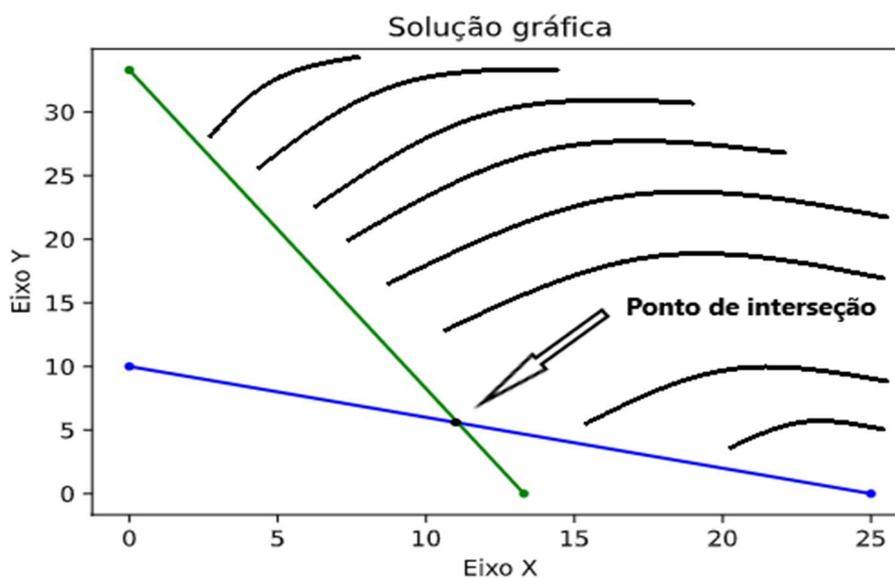
FIGURA 3 – SOLUÇÃO GRÁFICA DE UM EXEMPLO DE PL



Fonte: Autor (2022).

Logo utilizando o método de solução gráfica com intuito de encontrar o ponto ótimo que satisfaz as restrições, pode-se visualizar pela FIGURA 4 qual é o ponto de interseção e qual região que contempla os possíveis pontos viáveis.

FIGURA 4 – VISUALIZAÇÃO DO PONTO ÓTIMO



Fonte: Autor (2022).

Observa-se que temos um espaço de soluções, logo todos os pontos acima das retas são pontos que satisfazem as restrições, todavia dentre todos há apenas um ponto suspeito a ser a nossa solução ótima, sendo ele a interseção entre as retas R1 e R2.

$$\text{Igualando} \quad R1 = R2$$

$$\text{Temos} \quad x \approx 11,13 \text{ e } y \approx 5,55$$

$$\text{Logo} \quad Z = 150X + 120Y$$

$$Z = 150 \cdot (11,13) + 120(5,55)$$

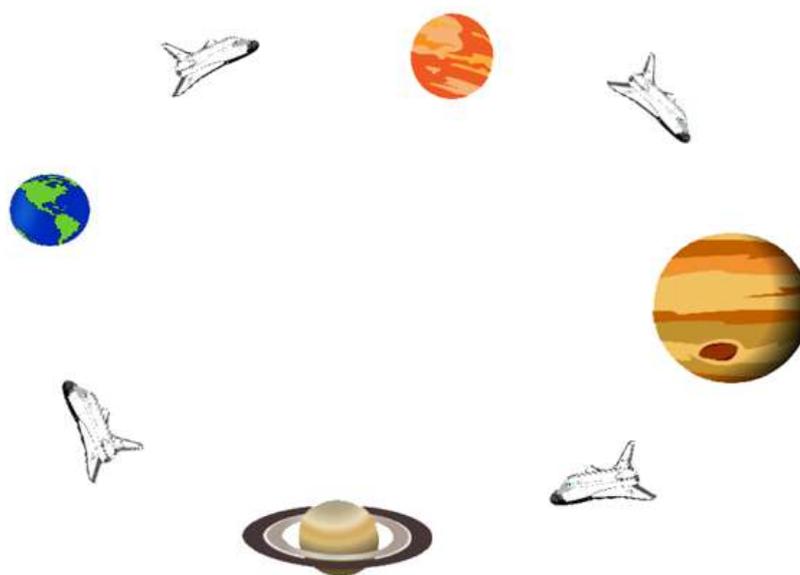
$$Z \approx 233,55$$

2.4 TRAVELLING SALESMAN PROBLEM

Travelling Salesman Problem mais conhecido como o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) é um problema clássico da PO, consiste em um conjunto de cidades onde o entregador se desloca de sua cidade local, passando por todas as cidades apenas uma vez e retornando a sua cidade de origem, é um dos problemas mais estudados em problemas de roteamento em nós. (ARENALES, 2015)

Para exemplificar melhor este conceito do Problema do Caixeiro Viajante, pode-se verificar através da FIGURA 5, um problema onde um astronauta da NASA, gostaria de passar por quatro planetas do sistema solar, entregando pessoas em cada planeta visando a criação de colônias, e retornando a terra sendo seu ponto de origem.

FIGURA 5 – EXEMPLO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE



Fonte: Autor (2022).

Para este caso, a solução do Problema do Caixeiro Viajante seria trazer para este astronauta a rota mais viável a se fazer, considerando a distância de viagem e o tempo percorrido, fazendo com que ele possa fazer as entregas e retornar à sua origem da melhor forma possível.

2.4.1 Formulação matemática do TSP

O presente problema clássico de pesquisa operacional já mencionado anteriormente, tem por sua formulação matemática a seguinte modelagem:

$$\text{Mín} \sum_{i=1, j=1}^m C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1, i \neq j}^m X_{ij} = 1, \quad i = 1 \quad \dots \quad , \quad m \quad (2)$$

$$\sum_{x=1, j \neq i}^m X_{ij} = 1, \quad j = 1 \quad \dots \quad , \quad m$$

$$X_{ij} = 1 \text{ ou } 0, \quad X \in B^{n(n-\frac{1}{2})} \quad (3)$$

Os coeficientes da função objetivo (1) definem a somatória das distâncias entre os pontos da rota a ser minimizada, os coeficientes das restrições (2) garantem que o caixeiro passe por cada ponto da rota sem repetições e a restrição (3) define os tipos de variáveis, sendo elas binárias.

Para que haja uma solução para o Problema do Caixeiro Viajante é necessário que todas as soluções possíveis sejam enumeradas. Para isto utiliza-se a fórmula: $R(n) = (n - 1)!$, que representa o número de rotas possíveis do problema.

Considerando o exemplo anterior representado pelo astronauta, temos quatro planetas a serem visitados, logo:

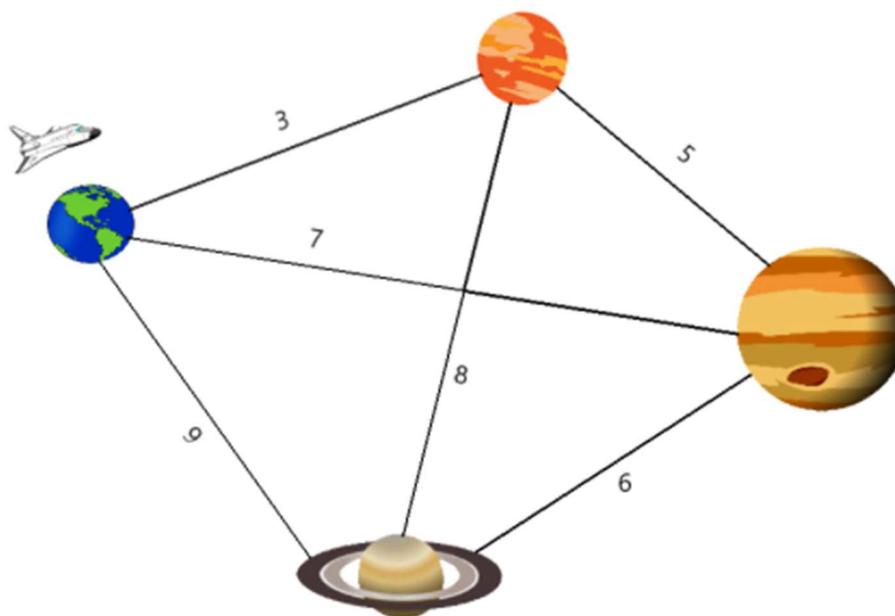
$$R(n) = (4 - 1)!$$

$$R(n) = 6$$

Observa-se que existem 6 caminhos possíveis para o problema do astronauta, para exemplificar melhor este problema, foi desenvolvido um exemplo que pode ser

visualizado através da FIGURA 6. Considerando o tempo de trajeto e a distância entre ambos os planetas sendo o custo de transporte, temos o seguinte problema:

FIGURA 6 – EXEMPLO DE SOLUÇÃO PARA O PCV



Fonte: Autor (2022).

Os seis caminhos possíveis estão representados na TABELA 1:

TABELA 1 - SIMULAÇÃO PROBLEMA DO ASTRONAUTA

	Percurso	Custo
Rota 1	Terra - Marte - Júpiter - Saturno - Terra	23
Rota 2	Terra - Marte - Saturno - Júpiter - Terra	24
Rota 3	Terra - Júpiter - Marte - Saturno - Terra	29
Rota 4	Terra - Júpiter - Saturno - Marte - Terra	24
Rota 5	Terra - Saturno - Marte - Júpiter - Terra	29
Rota 6	Terra - Saturno - Júpiter - Marte - Terra	23

Fonte: Autor (2022).

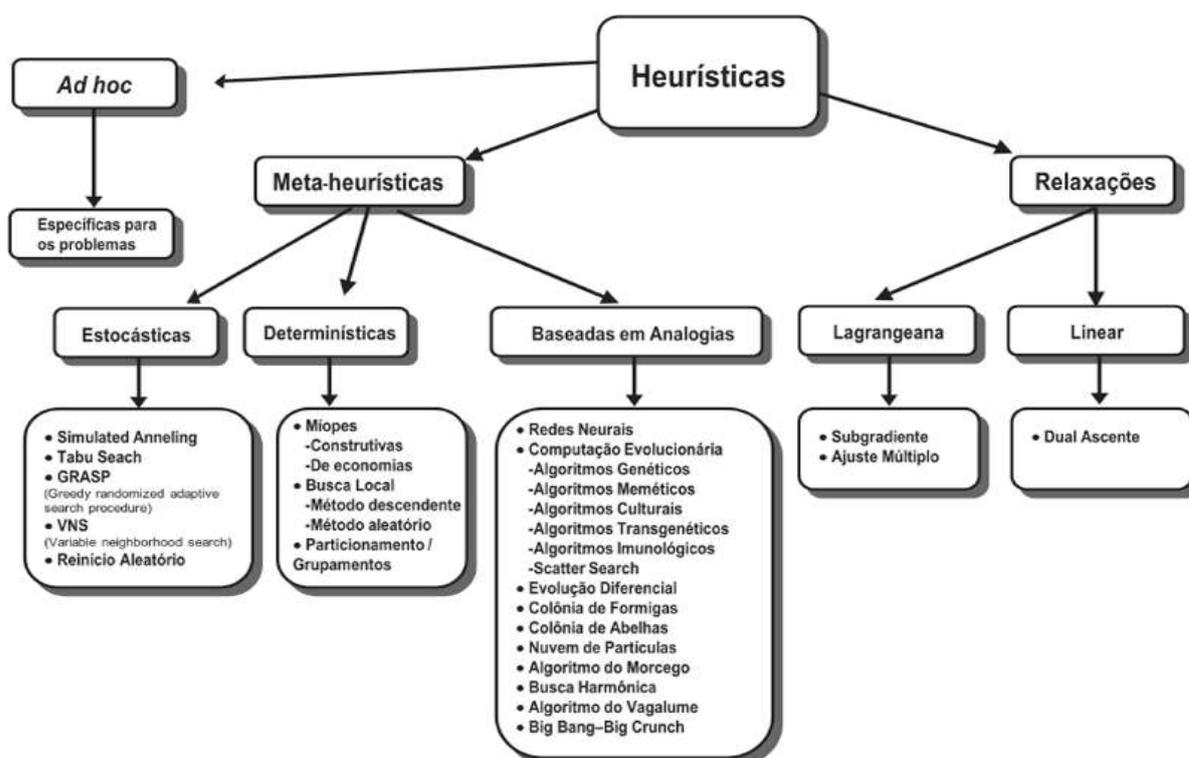
Analisando a TABELA 1, é possível observar que a Rota 1 e a Rota 6 obtiveram os menores custos de transporte comparada com as demais rotas, logo são as rotas mais viáveis para o problema, observa-se também que as mesmas estão com valores idênticos, sendo assim as melhores propostas de transporte para o astronauta.

2.5 MÉTODOS HEURÍSTICOS

O termo "heurística", do Grego "*heuriskein*", tem como conceito mais sucinto o ato de encontrar algo ou descobrir. É caracterizado como uma solução que de certa forma não há uma garantia de sucesso, ou seja, não há uma resposta direta para o problema, mas contém uma proximidade real. Uma heurística também pode ser considerada uma técnica computacional que desenvolve uma solução viável para um problema de otimização linear, utilizando-se o experimento de softwares computacionais. (GOLDBARG, 2016)

A FIGURA 7 demonstra através de um fluxograma o quão imenso é a área de pesquisa dos métodos heurísticos existentes.

FIGURA 7 – ÁREAS DAS HEURÍSTICAS



Fonte: Adaptado de Goldberg (2016).

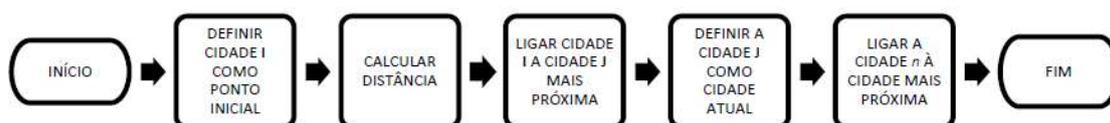
Existe outro método de solução para problemas de programação linear que é denominado pelo nome Métodos Exatos, todavia durante esta pesquisa utilizaremos apenas os métodos heurísticos para desenvolver as soluções do problema do caixeiro viajante.

2.5.1 Nearest Neighbor Heuristic

A *Nearest Neighbor Heuristic*, mais conhecida como a heurística do vizinho mais próximo, como o próprio nome menciona, se trata de uma heurística que consiste na inserção do vizinho mais próximo ao nó atual que estará posteriormente sequenciado ao problema. Com isto espera-se uma boa solução para o Problema do Caixeiro Viajante a ser encontrado, considerando que se pode partir de qualquer ponto (nó inicial) e posteriormente conectando aos demais nós do problema. O processo finaliza quando todo o roteiro de viagem é totalmente preenchido e pode-se considerar uma solução viável (BOYCHIKO, 2019).

Na FIGURA 8, apresenta-se o fluxograma de funcionamento que exemplifica a heurística de *Nearest Neighbor*.

FIGURA 8 – FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO NEAREST NEIGHBOR



Fonte: Adaptado de Boychiko (2019).

2.5.2 K-opt

De acordo com Lin e Kernighan (1973) citado por Boychiko (2019), o método *K-opt* corresponde à um número k de arcos que são removidos de um roteiro e substituídos por outros k arcos, com o objetivo de diminuir a distância total percorrida removendo os cruzamentos, ou seja, quanto maior o número de k , melhor a precisão do método. Todavia há um esforço computacional muito maior para atingir uma melhor solução, quando se trata de um valor muito alto de k .

Considerando que o *K-opt* é um heurística de busca local, pode-se afirmar que essa classe busca melhorar uma solução do PCV e para isto busca-se uma solução inicial partindo de um método construtivo que tem como estratégia primordial a eliminação dos possíveis cruzamentos do roteiro.

2.6 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON

A linguagem Python foi desenvolvida no início dos anos 90 pelo matemático e programador holandês Guido van Rossum, através de um projeto pessoal que se intitulava como um pequeno “hobby” e atualmente é considerada a linguagem mais conhecida e utilizada no mundo. 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 de aprendizado a programação, o Python também pode ser utilizada como uma ferramenta particular de desenvolvimento e distribuição de software ou até mesmo seu código fonte pode ser baixado e visualizado sem restrições (BANIN, 2018).

Um exemplo de programa desenvolvido através da linguagem Python, é o programa “Hello World”, que ficou muito conhecido quando foi comparado às outras demais linguagens, enfatizando a facilidade de programar em Python e a compreensão dos resultados. Este exemplo está explícito na FIGURA 9.

FIGURA 9 – REPRESENTAÇÃO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO PYTHON



Fonte: Google Imagens (2022).

Este script é muito utilizado para cursos introdutórios em Python. Todo programador iniciante já passou por este exemplo de programação, correlacionando

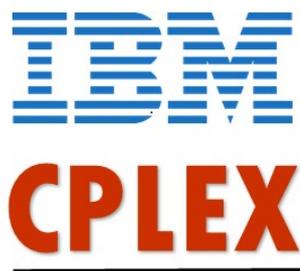
o script em outras linguagens (C, C + +, Java) e vendo a complexidade das mesmas comparado ao Python.

2.7 SOLVER CPLEX

O IBM-ILOG-CPLEX 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 CPLEX contém uma aplicabilidade gigantesca, é capaz de fazer integrações com diversas linguagens de programação, ou se preferir também pode-se utilizar a própria interface gráfica do CPLEX desenvolvida pela IBM.

O presente objetivo deste trabalho é estudar o Solver CPLEX fazendo uma integração com a Linguagem Python, trazendo uma solução ótima para o problema do Caixeiro Viajante através de ambas ferramentas listadas. A FIGURA 10 representa a logo marca da ferramenta IBM-CPLEX, utilizada para as soluções heurísticas.

FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DO SOLVER IBM-CPLEX



Fonte: Google Imagens (2022).

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada para atingir os resultados do problema de pesquisa proposto. Para isto será mencionado o enquadramento da pesquisa junto com sua abordagem, a caracterização da empresa, o cenário atual da empresa e os métodos de análises e coleta de dados.

3.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA

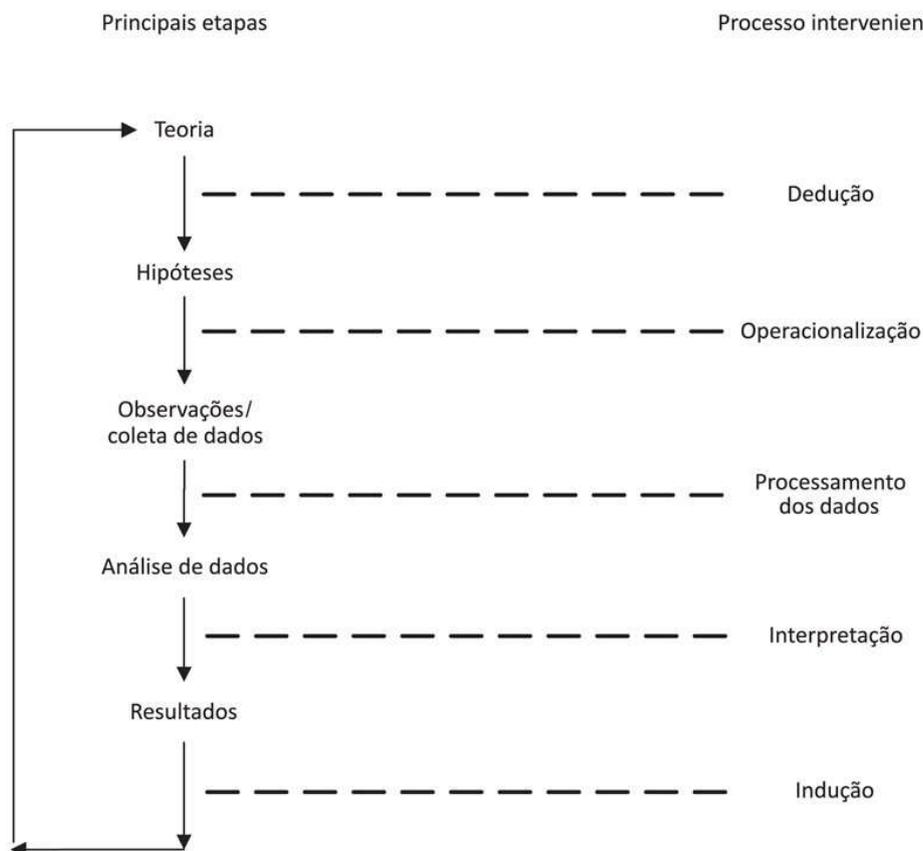
Para Rudio (1986) a palavra “pesquisa” de maneira ampla é basicamente um conjunto de atividades que visam a busca de um determinado conhecimento. Logo o objetivo fundamental de uma pesquisa seria adquirir conhecimento através de respostas para diversos problemas, mediante o emprego de ações feitas pelo pesquisador visando a obtenção de um resultado, onde essas ações podem ser de caráter científico, analítico ou qualitativo.

Do ponto de vista de sua natureza podemos classificar esta pesquisa como aplicada, pois seu objetivo é a redução do tempo e da distância percorrida de viagem inerentes ao roteamento de transporte que atualmente são feitas por uma transportadora de implementos agrícolas. Tal objetivo está associado com a definição que Gil (1991) citado por Silva e Menezes (2001) trouxe. Ele afirma que a principal ênfase de uma pesquisa aplicada está na geração de conhecimento para a aplicação prática de soluções de problemas específicos, além de envolver verdades e interesses locais.

Sua abordagem é categorizada como quantitativa pois segundo Cauchik (2018) o ato de mensurar variáveis de pesquisa é a característica mais marcante da abordagem quantitativa, ou seja, os dados de tempos de viagem, as distâncias percorridas, os valores de latitude e longitude de cada local, se enquadram totalmente no que denotamos como variáveis de pesquisa, logo a sua mensuração está interligada a característica deste tipo de abordagem.

A FIGURA 11 representa a estrutura lógica que envolve uma abordagem quantitativa.

FIGURA 11 – ESTRUTURA DE UMA ABORDAGEM QUANTITATIVA



Fonte: Bryman (1989) apud Cauchik (2018).

Tais variáveis de pesquisa serão analisadas e calculadas através de métodos computacionais já mencionados anteriormente, se enquadrando como um dado matemático, ou seja, a empresa terá um resultado concreto de redução de sua jornada de viagem através de valores estatísticos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa base para a aplicação desta pesquisa é 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. Tem como predominância o transporte de 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 conta hoje com três motoristas particulares e dois sócios-

administradores, caracterizando a empresa como uma empresa familiar e de pequeno–porte.

Esta sociedade iniciou suas atividades no ano de 1999 onde atendia grande parte da região com serviços especializados em mecânica de máquinas pesadas voltado pro agronegócio. Permanecerem no ramo apenas da manutenção das máquinas durante 11 anos, todavia também prestavam o serviço de transportar a máquina até o cliente quando necessário, após o término do processo de ajustes internos. Foi neste momento que o atual sócio proprietário pôde enxergar a oportunidade de atuar no ramo do transporte de máquinas, devido à dificuldade de as empresas realizarem o transporte de suas máquinas aos fornecedores de serviços especializados. Assim após o ano de 2010 a empresa vendo a demanda do mercado do transporte de implementos agrícolas e analisando a inviabilidade de fazer o serviço de mecânica em geral e o frete do produto, pode optar em seguir apenas com o serviço de transporte de máquinas, adquirindo assim clientes que necessitavam deste ramo na região e com o passar dos anos pode expandir seus negócios para alguns pontos do território nacional. Todos os dados e informações mencionadas no decorrer deste tópico, foram coletadas e desenvolvidas através de entrevistas presenciais de forma periódica com o gestor de frotas da empresa que também é o sócio – proprietário, por se tratar de uma empresa familiar e de pequeno – porte.

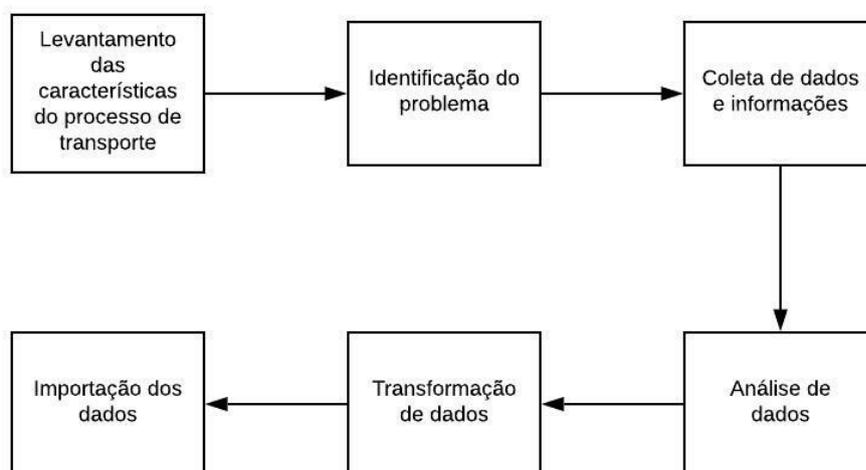
3.2.1 O cenário atual da empresa

Atualmente a empresa não contém nenhuma forma de planejamento para as rotas a serem percorridas mediante a demanda de seus clientes. O sócio proprietário e administrador é o principal contato de tais demandas e o principal responsável em fazer a programação das rotas de seus motoristas. De forma manual o gestor de frotas, preenche um documento que é categorizado como romaneio de carga, e repassa para seus motoristas tais destinos que eles devem percorrer para fazer as entregas. Os motoristas são responsáveis por preencher a quantidade de quilometragem registrada pelo caminhão no momento inicial e final assim que percorrer tal destino especificado pelo gestor de frotas. São responsáveis também pelo registro dos custos de transporte envolvendo rodovias pedagiadas, manutenção do veículo e necessidades pessoais advindas de sua jornada de trabalho.

dos dados na linguagem de programação Python, ou seja, os dados necessários para que o algoritmo possa ser alimentado e desenvolver a solução ótima para as rotas de distribuição da transportadora de implementos agrícolas. Informações quanto ao custo de tais rotas foram discutidas juntamente com os sócios-proprietários de forma estimada, pois não há a mensuração exata de tais custos atualmente na empresa.

O processo que envolve a coleta de dados pode ser exemplificado através do fluxograma representado pela FIGURA 13.

FIGURA 13 – PROCESSO DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS



Fonte: Autor (2022).

Basicamente houve um levantamento das principais características que compõe um processo de transporte de insumos e mercadorias, dentre este aspecto, foi possível compreender o principal problema que envolve tais ações, que no caso seria o custo elevado de operação, que está totalmente vinculado a distância percorrida de viagem. Para isto foi feito uma coleta de dados através de relatórios do sistema de sensoriamento dos caminhões e coleta de informações por entrevistas presenciais juntamente com o gestor e frotas. Para a análise de dados pode-se gerar gráficos de roteirização através da ferramenta da *Microsoft Power BI*, pelos dados de *Latitude e Longitude* coletados do sistema. Esta etapa tem como principal objetivo a visualização do comportamento dos dados para a transformação e importação no modelo que foi programado pela linguagem de programação *Python*.

4 DESENVOLVIMENTO

No presente capítulo são apresentados o desenvolvimento e resultados obtidos para o problema de roteirização da empresa, e que contou com a utilização dos métodos heurísticos para a otimização das rotas de transporte.

Os testes foram realizados através da utilização do solver IBM-CPLEX, ferramenta da matemática computacional que usa como recurso para sua aplicação a linguagem e programação Python. Os testes foram realizados em um *Acer Aspire E15*, na versão 10 do sistema operacional *Windows* em uma plataforma Intel Core i5, com 6 GB de memória RAM.

4.1 DADOS DE ROTEIRIZAÇÃO DA EMPRESA

A solução do problema identificado, consiste na minimização das rotas que envolvem entregas de mercadorias, onde determinados locais correspondem a algumas cidades de nosso território nacional. Estes locais possuem suas determinadas demandas, e conseqüentemente, determinada periodicidade. A frequência necessária indica a formação das rotas, que conseqüentemente, devido à diversidade de demandas, acabam não sendo padronizadas. Pode-se considerar que a empresa de forma simplista contém um certo controle sobre tais prazos e identificação das necessidades de entrega, logo o problema se dará por meio de uma lista de cidades, que deverão ser atendidas através de uma rota, onde o resultado da pesquisa trará um valor estatístico que representa a redução das rotas coletadas por meio da empresa.

Através das reuniões periódicas, foi decidido a utilização de cinco roteiros de carga para o desenvolvimento da pesquisa. Os roteiros representam cinco roteiros de entregas e correspondem a região do estado do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, regiões no qual a empresa atende de forma frequente.

A TABELA 2 exemplifica os cinco roteiros disponibilizados pela empresa e que serão utilizados como testes iniciais do algoritmo.

TABELA 2 – ROTERIZAÇÃO DA EMPRESA

Índice	Roteiro 1	Roteiro 2	Roteiro 3	Roteiro 4	Roteiro 5
0	Londrina	Londrina	Londrina	Londrina	Londrina
1	Rolândia	Guaravera	Manoel Ribas	Regente Feijó	Ourinhos
2	Arapongas	Floresta	Guarapuava	José Bonifácio	Marília
3	Amambaí	Campo Mourão	Pato Branco	Olímpia	Guaíçara
4	Aral Moreira	Ivatuba	Palmitos	Água Comprida	Miguelópolis
5	Ponta Porã	Doutor Camargo	Doutor Maurício Cardoso	Uberaba	Uberaba
6	Dourados	Rolândia	Passo Fundo	Araxá	Coromandel
7	Marechal Cândido Rondon	Cambé	Lagoa Vermelha	Ibiá	Guará
8	Floresta	Londrina	Barracão	Perdizes	Boa Esperança do Sul
9	Londrina		Luzerna	Barretos	Jaú
10			Palmeira	Taciba	Sertanópolis
11			Ponta Grossa	Sertanópolis	Londrina
12			Ortigueira	Londrina	
13			Londrina		

Fonte: Autor (2022).

Através dos valores de “KM INICIAL” e “KM FINAL” que o motorista preenche no romaneio anteriormente ilustrado pela Figura 12, pode-se calcular a quilometragem total de cada roteiro percorrido.

A TABELA 3 exemplifica a quantidade total percorrida por cada roteiro.

TABELA 3 – DISTÂNCIA PERCORRIDA PELO MOTORISTA

Roteiro 1	Roteiro 2	Roteiro 3	Roteiro 4	Roteiro 5
1770km	540km	2854km	1830km	1949km

Fonte: Autor (2022).

Abaixo pode-se verificar através da tabela 4 o tempo total de cada roteiro, ou seja, o tempo gasto pelo motorista desde o momento em que ele inicia a viagem no ponto $i = 0$, percorre todos os destinos onde $j > 0$ e retorna ao seu estado de origem, tempo representado pelo modelo de problema que corresponde ao Caixeiro Viajante.

Estes dados foram aferidos pelo banco de dados que o sensor transmite para o sistema, todo momento em que o caminhão percorre um certo ponto no mapa. Além de gerar os dados de latitude e longitude, também é gerado o momento em que este processo ocorre, no caso a data e o horário do ocorrido. Como um registro, semelhante a um apontamento de produção, nisto pode-se basear de forma aproximada o tempo gasto pelo motorista para cada viagem. Na TABELA 4 pode-se visualizar o tempo gasto pelo motorista em cada viagem assim estabelecida.

TABELA 4 – TEMPO GASTO PELO MOTORISTA EM VIAGEM

Roteiro 1	Roteiro 2	Roteiro 3	Roteiro 4	Roteiro 5
9649 minutos	6395 minutos	11507 minutos	4270 minutos	2876 minutos
160 horas e 49 minutos	106 horas e 35 minutos	191 horas e 47 minutos	71 horas e 10 minutos	47 horas e 56 minutos
6 dias, 16 horas e 49 minutos	4 dias, 10 horas e 35 minutos	7 dias, 23 horas e 47 minutos	2 dias, 23 horas e 10 minutos	1 dia 23 horas e 56 minutos

Fonte: Autor (2022).

Observa-se que existem viagens com tempos maiores correspondentes a distâncias menores. O mesmo é passível de ocorrência devido a possíveis contratempos no período de viagem para a entrega, como dificuldades com o caminhão ou algum atraso em relação aos clientes da empresa, em que o motorista teve que ficar mais tempo parado em posto de parada, aguardando o processo logístico acontecer. Uma das alternativas que acontecem frequentemente em empresas do ramo de transporte é alternativa estratégica de aguardar um tempo em

um determinado local, visando o carregamento de mercadorias que de certa forma, não estavam no plano logístico, mas surge como uma oportunidade para que o caminhão possa estar em sua máxima capacidade de carregamento. Uma frase muito conhecida entre essas áreas de atuação é “andar de carro vazio é custo dobrado”, ou seja, devido ao alto custo da manutenção de um caminhão, ele deve estar sempre com sua capacidade máxima.

4.1.1 Gráfico de roteirização

A empresa possui um sistema de sensoriamento remoto para os veículos que capta a localização de cada local percorrido pelo caminhão, e gera um banco de dados. Este é enviado para o sistema, onde o gestor de frotas pode acompanhar toda a trajetória de viagem do motorista, analisando cada local por onde passou. O banco de dados atua como um relatório do sistema, denominado por “Histórico de Posições”. Assim, através destes dados, pode-se compreender qual foi o real trajeto utilizado pelo motorista mediante o romaneio preenchido pelo mesmo.

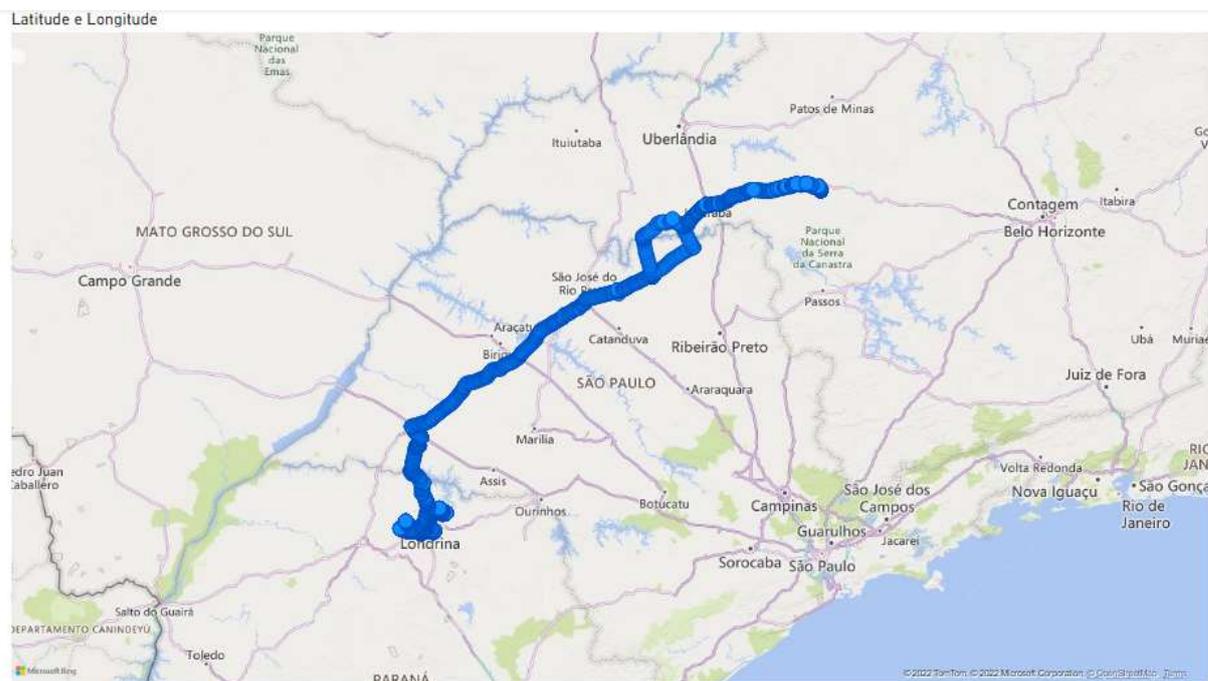
A FIGURA 14 ilustra os dados emitidos pelo sistema de sensoriamento.

FIGURA 14 – DADOS DO SISTEMA DE SENSORIAMENTO

Histórico de Posições								
Veículo		M.Benz Atego						
Motorista	Ignição	Velocidade (KM)	Endereço	Área	Latitude	Longitude		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266473	-51,17506		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266473	-51,17506		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266473	-51,17506		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266473	-51,17506		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266473	-51,17506		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266473	-51,17506		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266472	-51,17506		
	Desligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266519	-51,175113		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,26652	-51,175112		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Paraná, Londrina		-23,266553	-51,175209		
	Ligada	0	Rua Luís do Espírito Santo Júnior, 52, Paraná, Londrina		-23,266382	-51,175079		
	Ligada	0	Rua Luís do Espírito Santo Júnior, 52, Paraná, Londrina		-23,266382	-51,175079		
	Ligada	0	Rua Luís do Espírito Santo Júnior, 52, Paraná, Londrina		-23,266332	-51,174983		
	Ligada	0	Rua Luís do Espírito Santo Júnior, 52, Paraná, Londrina		-23,266332	-51,174983		

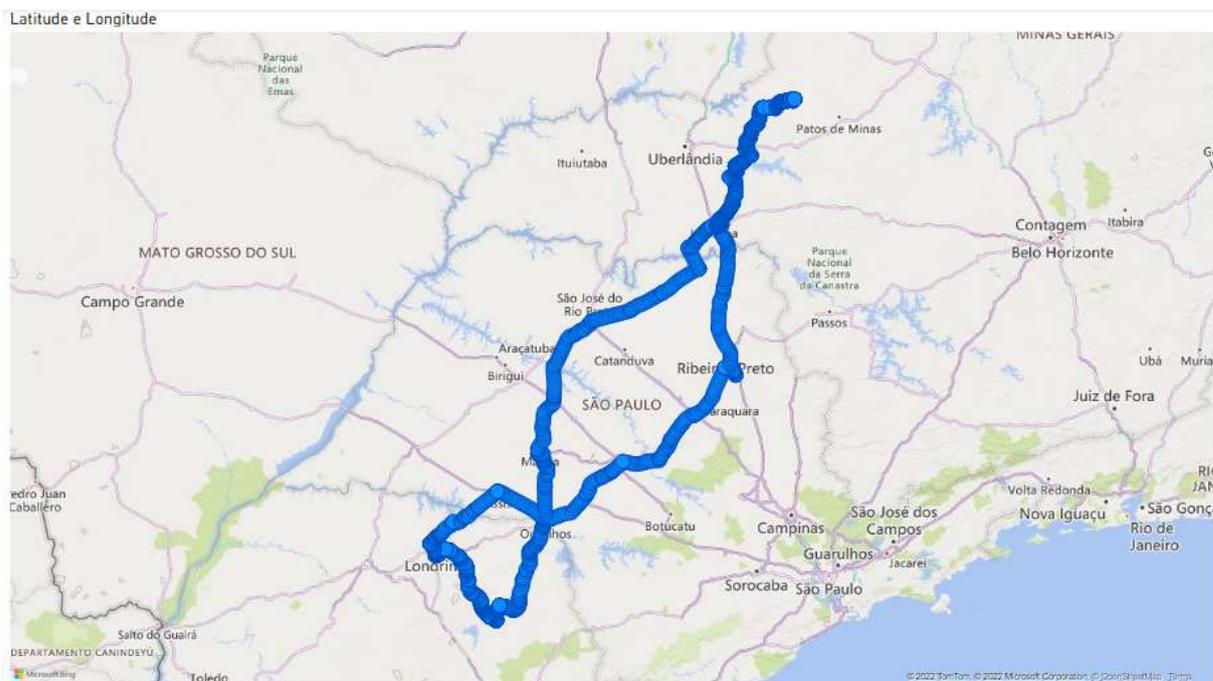
Fonte: Autor (2022).

FIGURA 18 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 4



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 19 – GRÁFICO DE MAPAS REFERENTE AO ROTEIRO 5



Fonte: Autor (2022).

Com as demonstrações acima é possível compreender qual foi a real distância percorrida e o real caminho tomado pelo motorista para executar as entregas das cidades visando o suprimento das necessidades de demanda.

Através deste caso real pode-se desenvolver a aplicação das meta-heurísticas pelo algoritmo solucionador, que envolve a Linguagem de Programação Python juntamente com o Solver IBM-CPLEX. Ele traz como resultado para a empresa a melhor rota a ser percorrida pelo motorista, visando as entregas nas cidades dos clientes frequentes da empresa, assumindo assim a possibilidade de padronizar as rotas mediante o uso do algoritmo, auxiliando também no planejamento das rotas de viagem para a gestão de frotas.

4.2 O ALGORITMO INTERMEDIÁRIO

Para a obtenção dos resultados foi necessária a construção de um algoritmo intermediário, onde foi desenvolvido os cálculos das heurísticas do Vizinho mais próximo e 2-opt, heurísticas no qual foram estudadas e abordadas no referencial teórico como a principal solução para o Problema do Caixeiro Viajante.

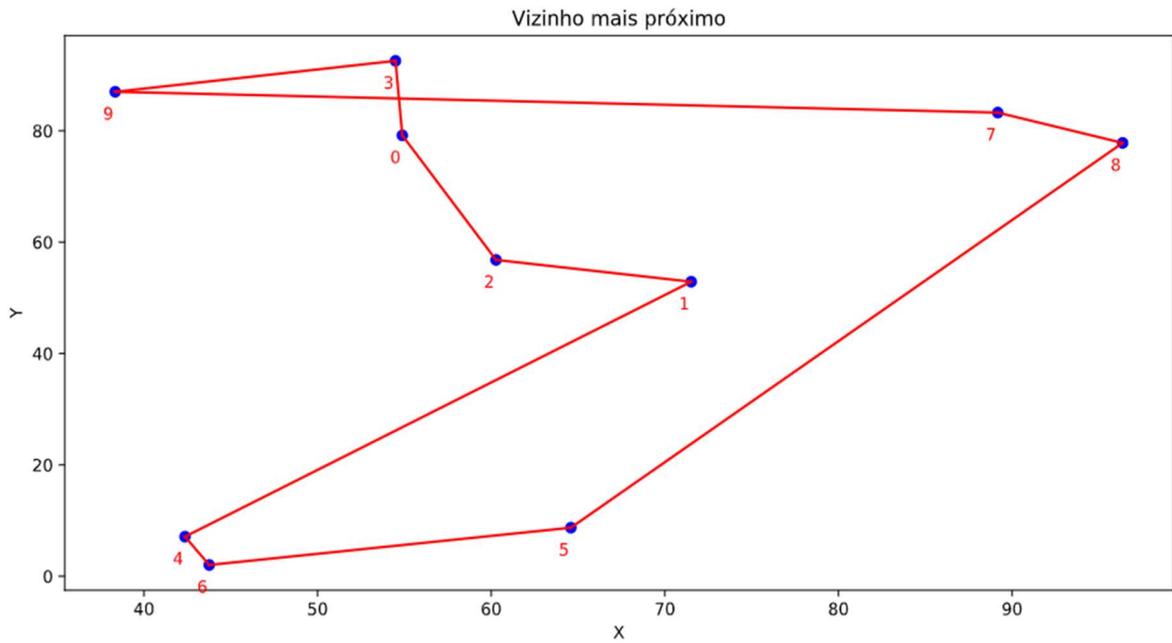
Trata-se de um modelo caracterizado por um conjunto de rotas plotadas em um plano cartesiano, que calcula as heurísticas para 10 e 15 locais pré-definidos, criando assim o gráfico de rotas otimizadas. Informações cruciais para o algoritmo final, que se trata da utilização dos dados reais da empresa.

As bibliotecas utilizadas para o desenvolvimento do algoritmo foram: *Numpy*, *Matplotlib*, *Pandas*.

A biblioteca *Pandas* foi responsável pela importação e tratamento dos dados, já a biblioteca *Matplotlib*, teve o caráter de plotar os gráficos referente aos cálculos das heurísticas.

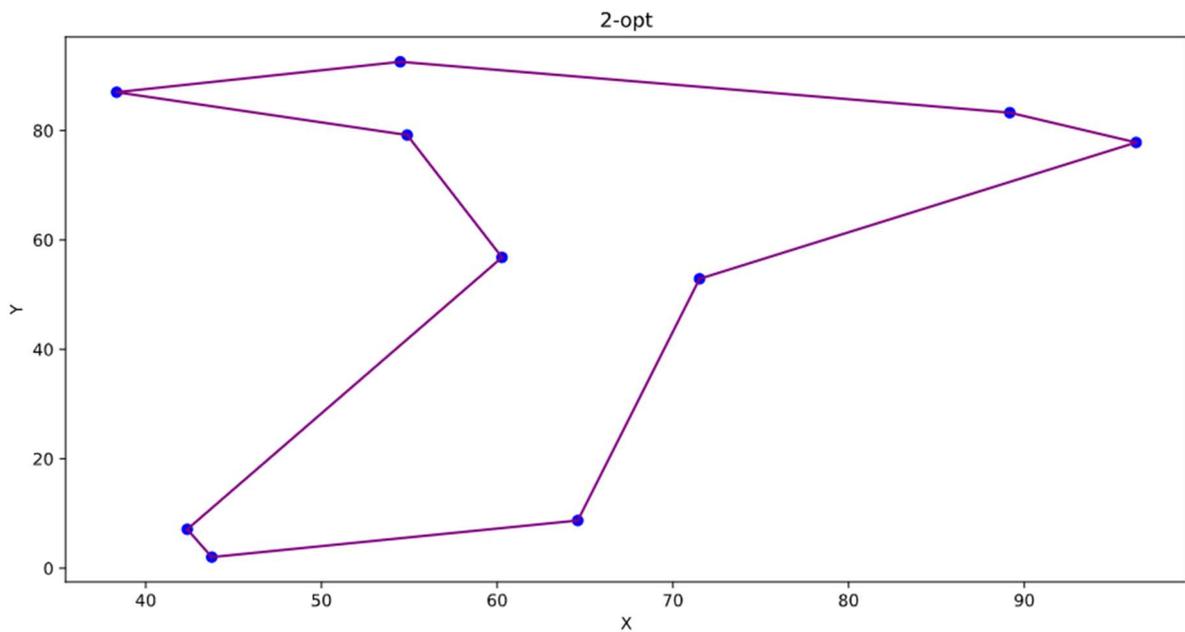
Neste algoritmo foi desenvolvido uma solução matemática utilizando a biblioteca Numpy da linguagem de programação Python, a FIGURA 20, FIGURA 21, FIGURA 22 e FIGURA 23 representam este resultado para o número de 10 e 15 locais definidos.

FIGURA 20 – VIZINHO MAIS PRÓXIMO COM 10 LOCAIS



Fonte: Autor (2022).

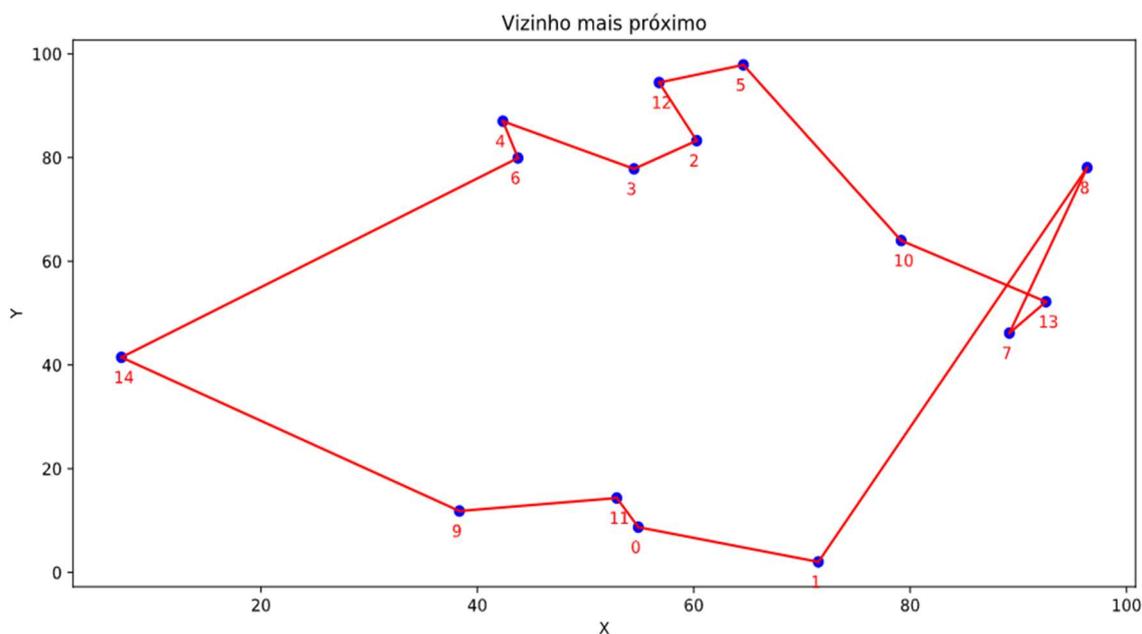
FIGURA 21 – 2-OPT COM 10 LOCAIS



Fonte: Autor (2022).

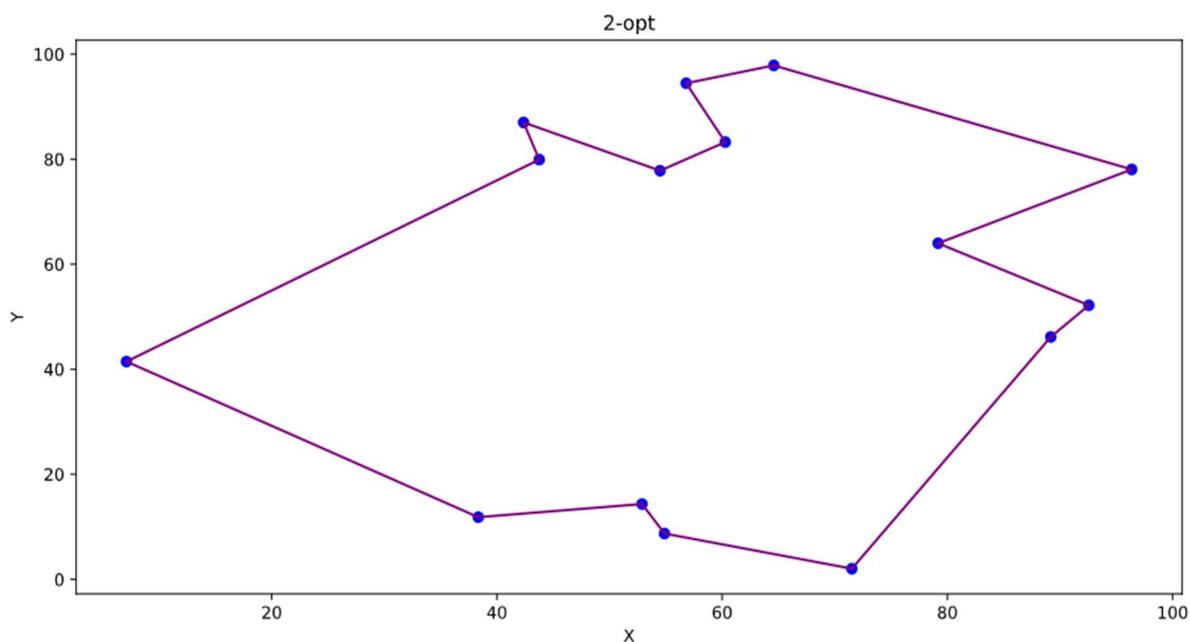
Considerando $n = 15$ temos outra solução assim exemplificada pela representação gráfica.

FIGURA 22 – VIZINHO MAIS PRÓXIMO COM 15 LOCAIS



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 23 – 2-OPT COM 15 LOCAIS



Fonte: Autor (2022).

Demais cálculos e gráficos foram gerados através da linguagem de programação Python e a utilização de bibliotecas externas como Matplotlib, biblioteca

responsável pela representação gráfica e a biblioteca Pandas responsável pela importação e tratamento dos dados para utilização dos cálculos no Numpy.

Mediante aos estudos abordados anteriormente pôde-se traçar vários pontos no plano cartesiano e ligar as rotas através de uma solução heurística. Pode-se assim afirmar que a heurística do 2opt demonstra de forma visual uma solução mais viável comparada a do Vizinho mais próximo. A TABELA 5 comprova a sentença acima, podendo visualizar qual heurística obteve uma solução mais viável para o problema.

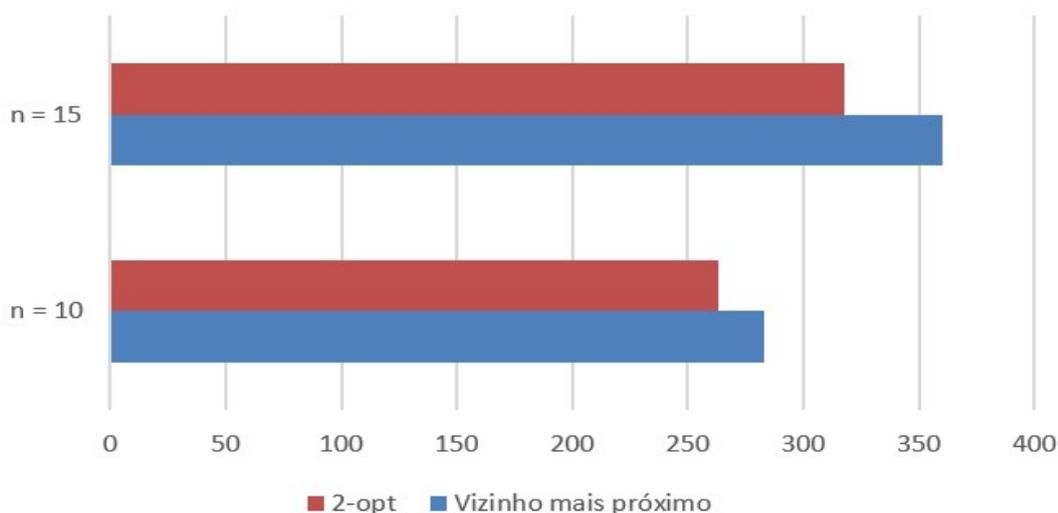
TABELA 5 – RESULTADO DAS HEURÍSTICAS PARA O ALGORITMO INTERMEDIÁRIO

Heurísticas	n = 10	n = 15
Vizinho mais próximo	282,86	359,78
2-opt	263,20	317,39

Fonte: Autor (2022).

Assim é possível afirmar que a heurística do 2-opt é a heurística mais viável para a solução do Problema do Caixeiro Viajante. Através da tabela anteriormente mencionada, a heurística do 2-opt obteve uma redução de 7% para n = 10 comparado a heurística do vizinho mais próximo, e 12% considerando n = 15 locais. A FIGURA 24 demonstra estes resultados das heurísticas.

FIGURA 24 – GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DAS HEURÍSTICAS



Fonte: Autor (2022).

O modelo é o candidato a ser o mais promissor em relação ao problema do Caixeiro Viajante e considerando o problema real da empresa.

Obtendo-se então os resultados através das heurísticas e considerando que o modelo matemático está desenvolvido, é possível iniciar as modelagens que envolvem o problema real da empresa, ou seja, o algoritmo que relaciona os dados da empresa e traz a rota através de uma representação gráfica e de um resultado de redução em seu tempo de viagem e deslocamento.

Pode-se considerar o modelo já introduzido dentro de um plano cartesiano, com valores denotados de forma aleatória. Para a solução final, basicamente seria necessário a utilização dos dados reais de uma empresa e a utilização de uma biblioteca que expressa esses dados de forma real, ou seja, o esboço dos mapas que representam arcos definidos.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO FINAL

Por se tratar de uma pesquisa que envolve uma aplicação matemática, o desenvolvimento de tal algoritmo não se enquadra a um desenvolvimento de software. O algoritmo tem caráter solucionador, ou seja, ele traz para o usuário o resultado de uma aplicação da matemática computacional. Dentre as diversas áreas da tecnologia, a que mais se enquadra ao modelo proposto seria a área de Data Science, onde é resolvido um problema logístico através de dados e análises estatísticas. Foi desenvolvido também a modelagem que compõe as heurísticas propostas sendo elas a 2-opt e a do Vizinho Mais Próximo.

Para o desenvolvimento do algoritmo final, foi utilizado como base o algoritmo intermediário mencionado anteriormente. Nele foi feito o cálculo das heurísticas, e em seguida implementado os dados reais da empresa, referente a cada roteiro, através da biblioteca do Pandas, uma biblioteca do Python que corresponde ao tratamento de dados.

Destacar a presença da biblioteca *Folium*, que no caso não havia sido introduzida no algoritmo intermediário, onde foi responsável por parametrizar os arcos e traçar rotas em linha reta referente a otimização.

Na FIGURA 25 pode-se observar a importação dos dados dentro da linguagem de programação Python.

FIGURA 25 – IMPORTAÇÃO DOS DADOS

	Numero	Nome	Endereço
0	1	AGROTÉCNICA	Avenida Francisco Gabriel Arruda, 830, Londrin...
1	2	Entrega 1	Rolândia, Paraná
2	3	Entrega 2	Arapongas, Paraná
3	4	Entrega 3	Amambaí, Mato Grosso do Sul
4	5	Entrega 4	Aral Moreira, Mato Grosso do Sul
5	6	Entrega 5	Ponta Porã, Mato Grosso do Sul
6	7	Entrega 6	Dourados, Mato Grosso do Sul
7	8	Entrega 7	Marechal Cândido Rondon, Paraná
8	9	Entrega 8	Floresta, Paraná

	Latitude	Longitude
0	-23.266536	-51.175170
1	-23.312307	-51.372505
2	-23.404232	-51.442013
3	-23.106191	-55.228986
4	-22.867158	-55.383781
5	-22.654878	-55.613861
6	-22.168956	-54.967456
7	-24.580839	-54.028560
8	-23.616874	-52.084327

Fonte: Autor (2022).

Assim foi necessário programar as fórmulas da lógica que exemplifica as heurísticas do Vizinheiro mais próximo e a 2-opt. Foram abertas duas funções com objetivo de absorver o cálculo das heurísticas e assim aplicá-las nos dados importados. É possível visualizar tais funções nas imagens abaixo.

Pode-se visualizar tais funções na FIGURA 26 e FIGURA 27.

FIGURA 26 – FUNÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO

```
def vizinho_proximo(cidade_inicio, cidades, distancia):
    NN=[cidade_inicio]
    arcos_ativos=[]
    n=len(cidades)

    while len(NN)<n:
        k=NN[-1]
        nn={(k,j): distancia[(k,j)] for j in cidades if k!=j and j not in NN}
        new=min(nn.items(),key=lambda x:x[1]) #ver
        NN.append(new[0][1])
        arcos_ativos.append(new[0])
    NN.append(cidade_inicio)
    arcos_ativos.append((arcos_ativos[n-2][1],arcos_ativos[0][0]))
    return NN, arcos_ativos
```

Fonte: Autor (2022).

FIGURA 27 – FUNÇÃO 2-OPT

```

def BL_2opt(NN,distancia):

    min_mudar=0

    for i in range(len(NN)-1):
        for j in range(i+2,len(NN)-1):

            custo_atual=distancia[(NN[i],NN[i+1])] + distancia[(NN[j],NN[j+1])]
            custo_novo=distancia[(NN[i],NN[j])] + distancia[(NN[i+1],NN[j+1])]
            mudar=custo_novo-custo_atual

            if mudar<min_mudar:
                min_mudar=mudar
                min_i=i
                min_j=j

    if min_mudar < 0:
        NN[min_i+1:min_j+1]=NN[min_i+1:min_j+1][::-1]

    return NN

```

Fonte: Autor (2022).

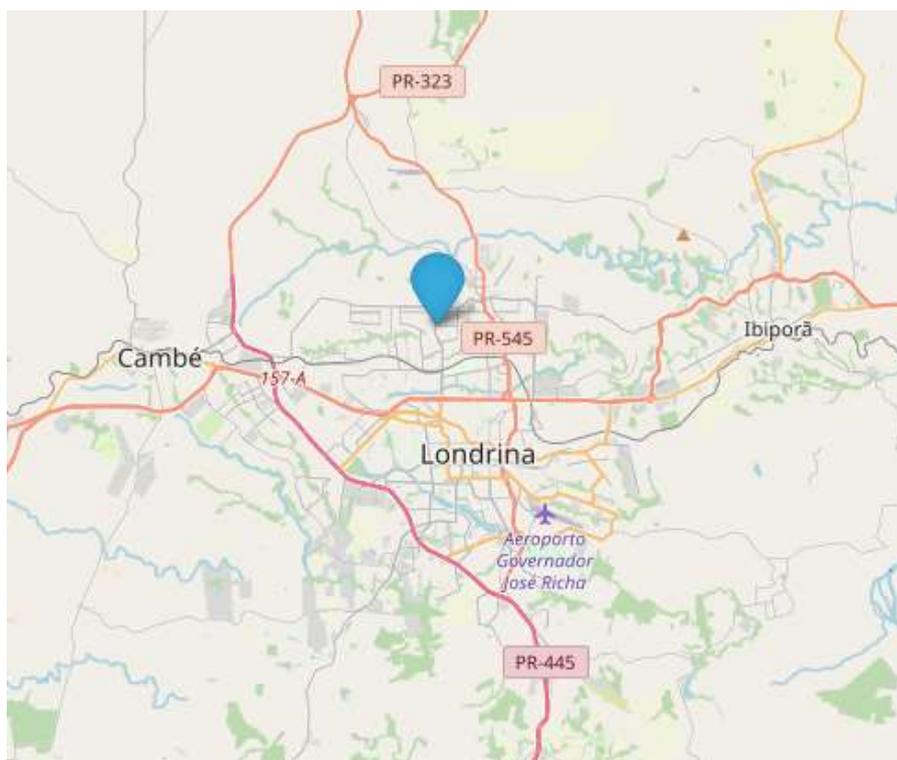
Na FIGURA 27 identifica-se o “ i ” como origem, “ j ” o destino de cada ponto e NN o ponto inicial do arco. Conseqüentemente através da execução da função, a variável se transforma em um arco otimizado.

Avaliando todas as aplicações pôde-se concluir que há existência de um modelo matemático definido, todavia a pesquisa pôde trazer uma abordagem de gestão visual com ferramentas gráficas que exemplifica os resultados obtidos.

Um das bibliotecas utilizadas para a visualização dos resultados é a *Folium*, biblioteca responsável pela criação de mapas interativos. A imagem abaixo demonstra a visualização do ponto de origem da rota, local em que o motorista tomou como ponto de partida de sua viagem.

A FIGURA 28 demonstra a plotagem de um gráfico de mapas desenvolvido pela biblioteca *Folium*, utilizando a linguagem de programação Python. O ponto no mapa é representado pela cidade de início, ou seja, o local de ponto de partida de empresa, que no caso representa a localização da transportadora na cidade de Londrina – PR.

FIGURA 28 – APLICAÇÃO DA BIBLIOTECA FOLIUM



Fonte: Autor (2022).

Este ponto representa o valor de $i = 0$ e posteriormente o valor inicial da variável NN, responsável por absorver o cálculo das funções que representam as heurísticas propostas.

Por fim, o algoritmo imprime os resultados dos arcos otimizados, que no presente foram os últimos valores da variável NN, e plota o gráfico de mapas, concluindo assim o algoritmo final, e podendo demonstrar os resultados para a transportadora.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para que os resultados pudessem ser melhor compreendidos, foi separado um tópico para cada rota assim estabelecida. Neste formato pode-se visualizar de forma separada cada resultado de otimização e a correlação dos mesmos com os dados atuais da empresa.

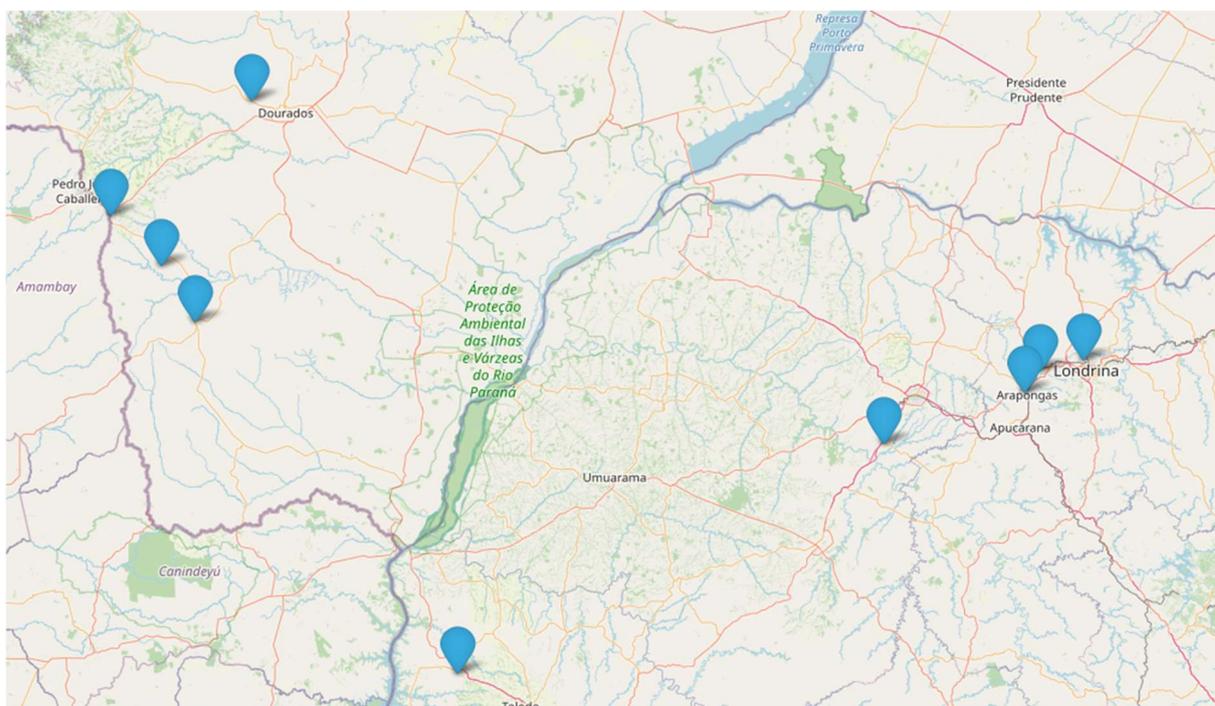
De início o algoritmo imprime os pontos dos locais estabelecidos como parada para entrega, ou seja, as cidades mencionadas na TABELA 2 e seus respectivos índices. Através dos índices podemos visualizar o novo roteiro, a nova distribuição

dos locais feito pelo cálculo do algoritmo. Imprime em seguida a ligação dos arcos em linha reta através da biblioteca *Folium*. O algoritmo não imprime a parametrização das rodovias estaduais a se percorrer, por isso foi desenvolvido tal parametrização através do *Google Maps* e *Bing*.

4.4.1 Roteiro 1

Na FIGURA 29 pode-se visualizar os locais definidos através da biblioteca *Folium* referente ao Roteiro 1.

FIGURA 29 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 1



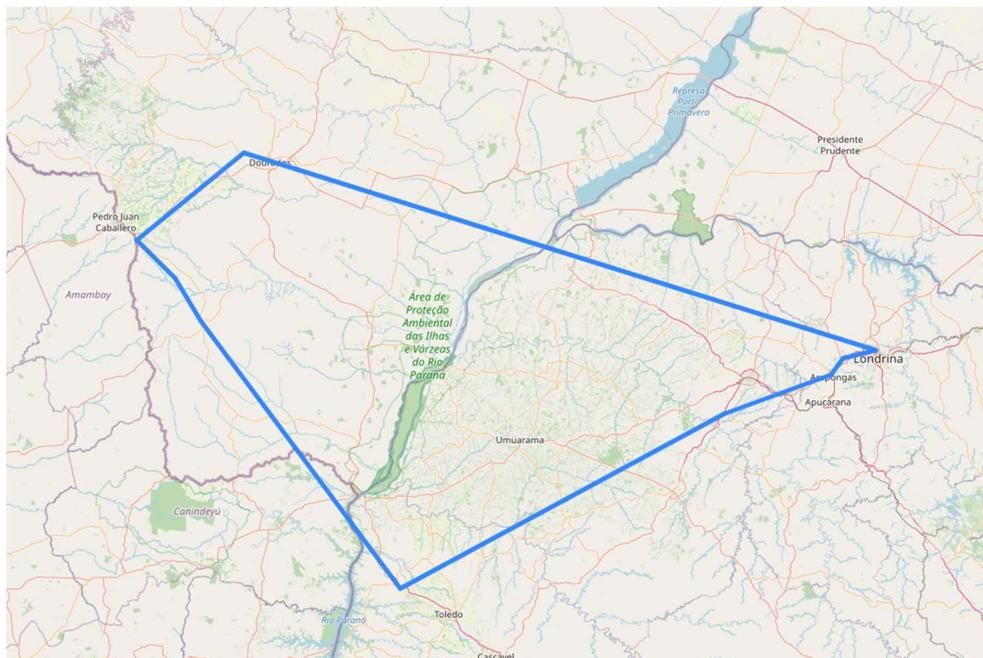
Fonte: Autor (2022).

Abaixo pode-se verificar a ligação dos arcos em linha reta impressa através da biblioteca *Folium*, e após o cálculo das heurísticas Vizinho mais próximo e 2-Opt.

Neste roteiro ambas heurísticas obtiveram o mesmo resultado, todavia foi impresso apenas um gráfico.

Na FIGURA 30 pode-se visualizar os arcos interligados por uma linha reta, traçando cada local assim estipulado.

FIGURA 30 – SOLUÇÃO DAS HEURÍSTICAS EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 1



Fonte: Autor (2022).

Na TABELA 6 pode-se entender o roteiro otimizado através do cálculo das heurísticas.

TABELA 6 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 1

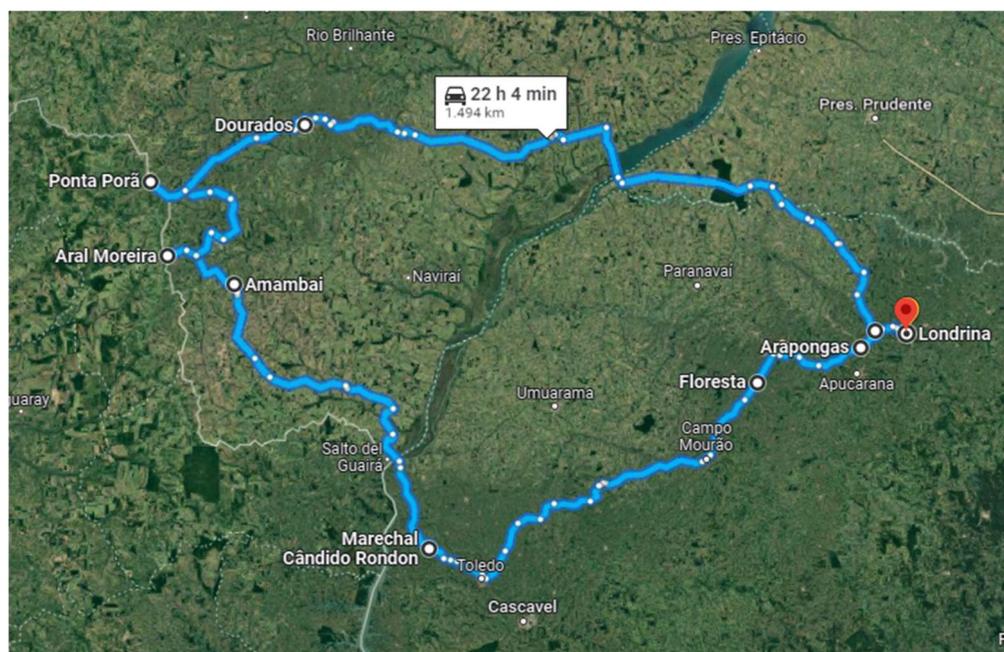
Vizinho mais próximo									
0	1	2	8	7	3	4	5	6	0
2 - Opt									
0	1	2	8	7	3	4	5	6	0

Fonte: Autor (2022).

Assim que foi obtido o roteiro otimizado, pôde-se desenvolver a parametrização das rotas pelo *Google Maps*, utilizando as rodovias estaduais de nosso país e visualizar também a redução de tempo e distância percorrida em relação ao aspecto atual do roteiro utilizado pela empresa.

A FIGURA 31 exemplifica a parametrização do roteiro 1 otimizado via métodos heurísticos.

FIGURA 31 – PARAMETRIZAÇÃO DO ROTЕIRO 1

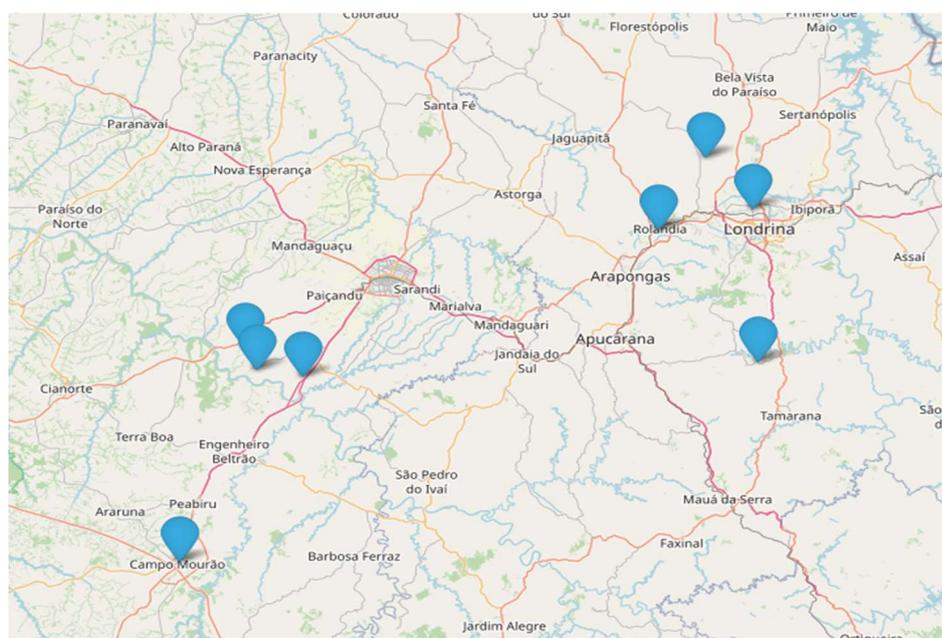


Fonte: Autor (2022).

4.4.2 Roteiro 2

Na FIGURA 32 pode-se visualizar os locais definidos através da biblioteca *Folium* referente ao Roteiro 2.

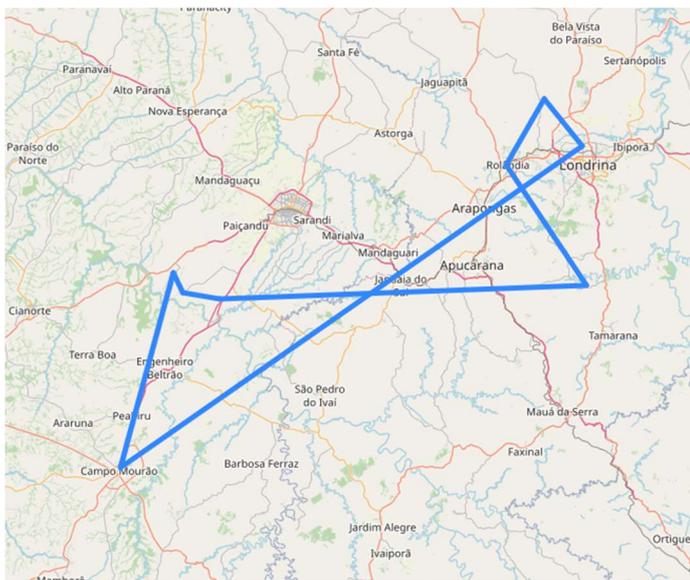
FIGURA 32 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTЕIRO 2



Fonte: Autor (2022).

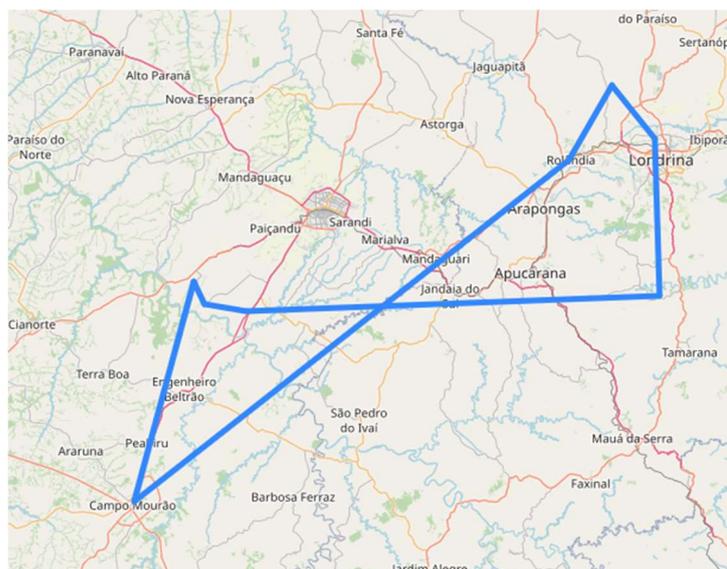
Na FIGURA 33 e FIGURA 34 pode-se visualizar a ligação dos arcos em linha reta impressa através da biblioteca *Folium*, e após o cálculo das heurísticas Vizinho mais próximo e 2-Opt. Neste roteiro houve uma pequena diferença entre as duas heurísticas, ou seja, cada heurística obteve um resultado adverso.

FIGURA 33 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA VIZINHO MAIS PRÓXIMO EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 2



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 34 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA 2-OPT EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 2



Fonte: Autor (2022).

Na TABELA 7 compreende-se o roteiro otimizado através do cálculo das heurísticas.

TABELA 7 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTIEIRO 2

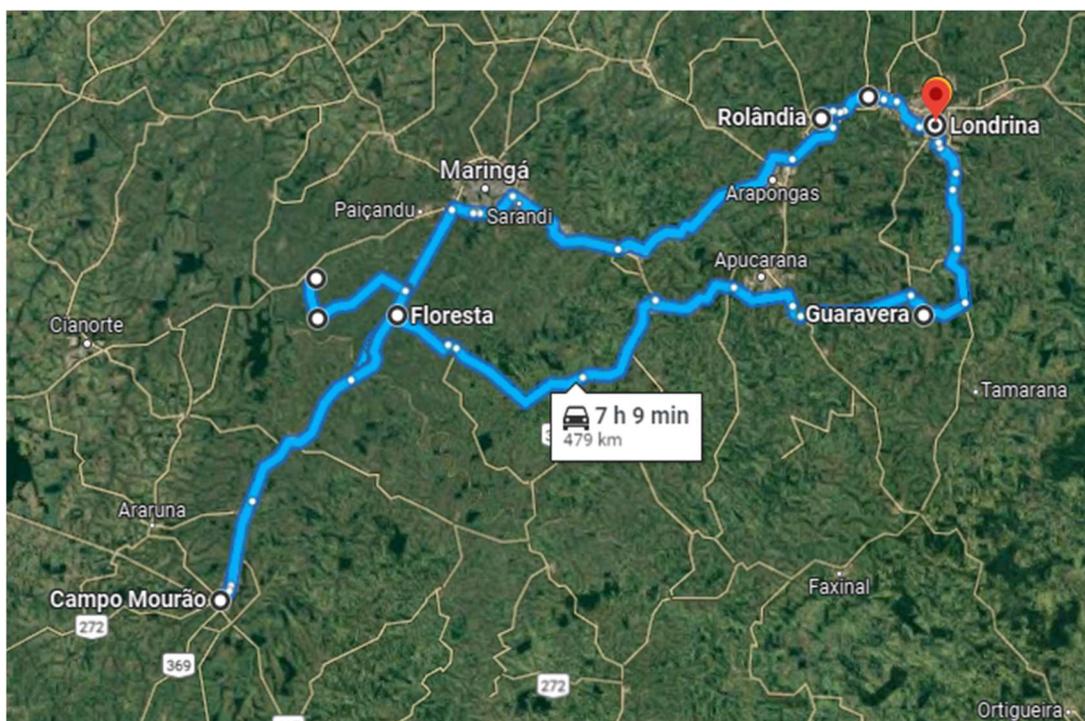
Vizinho mais próximo								
0	7	6	3	5	4	2	1	0
2 - Opt								
0	7	6	2	5	4	3	1	0

Fonte: Autor (2022).

Pode-se observar que a heurística do 2-Opt se diferenciou por um pequeno intervalo neste roteiro comparado com a heurística do Vizinho mais próximo.

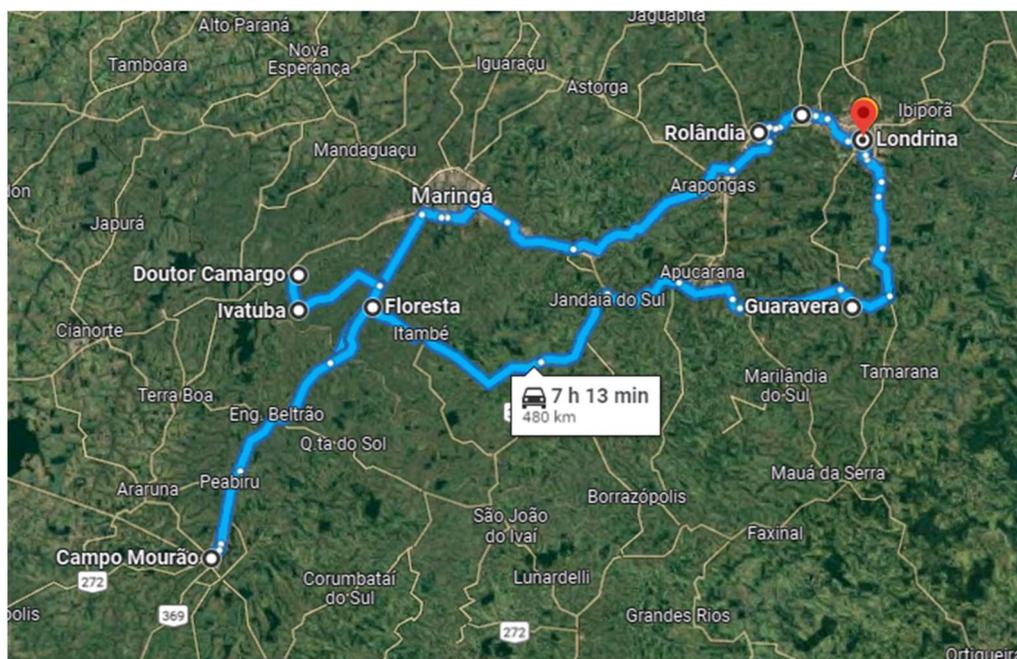
A FIGURA 35 e FIGURA 36 exemplifica a parametrização do Roteiro 2 otimizado via métodos heurísticos.

FIGURA 35 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO PARA O ROTIEIRO 2



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 36 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 2-OPT PARA O ROTЕIRO 2

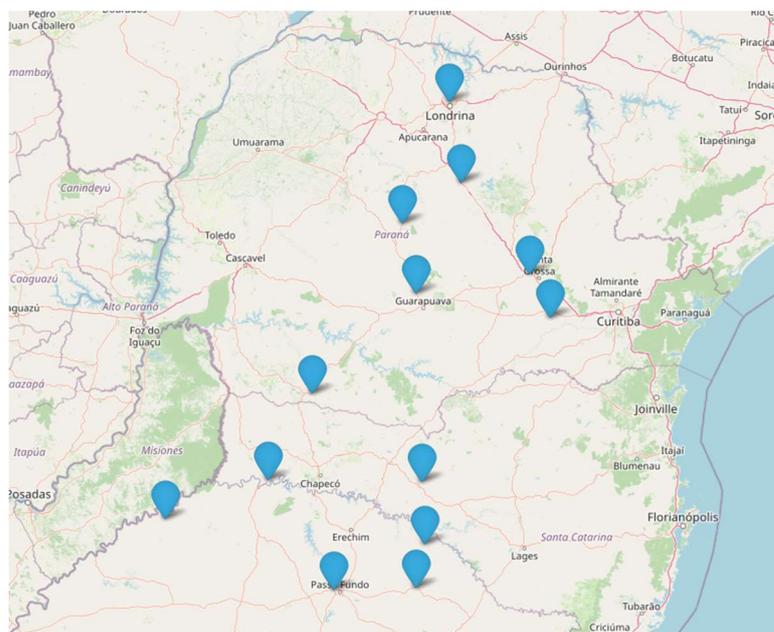


Fonte: Autor (2022).

4.4.3 Roteiro 3

Na FIGURA 37 pode-se assimilar os locais definidos através da biblioteca *Folium* referente ao Roteiro 3.

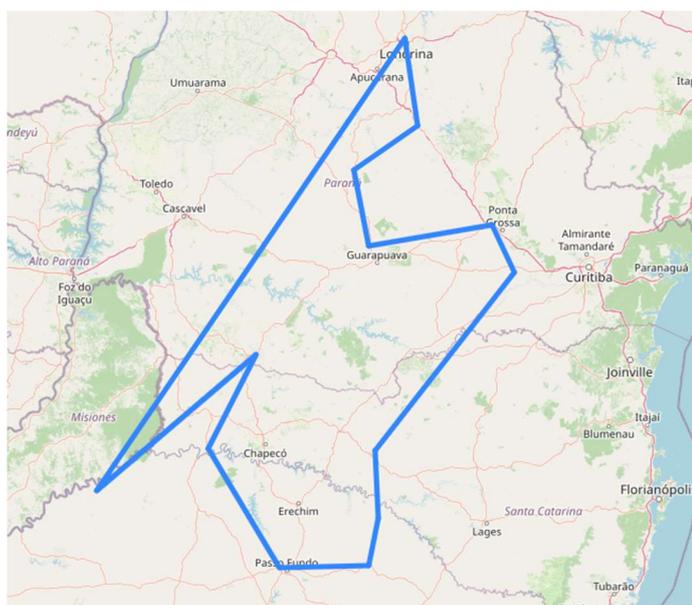
FIGURA 37 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTЕIRO 3



Fonte: Autor (2022).

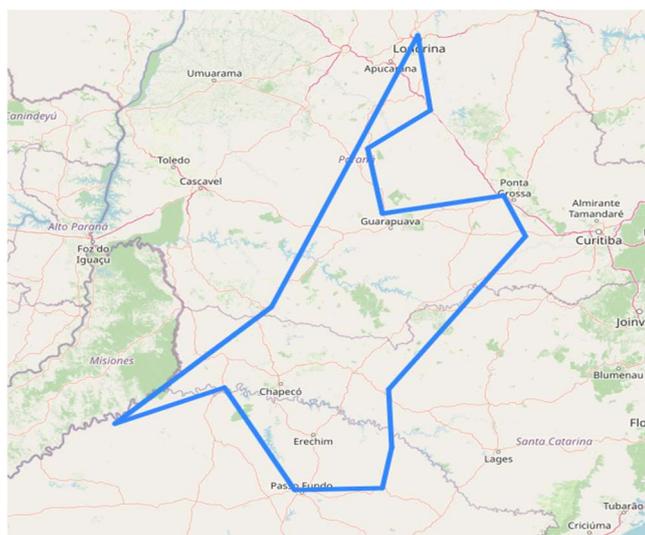
Na FIGURA 38 e FIGURA 39 pode-se constatar a ligação dos arcos em linha reta impressa através da biblioteca *Folium* e após o cálculo das heurísticas Vizinho mais próximo e 2-Opt. Neste caso, por se tratar de um roteiro bem extenso, as chances das heurísticas se igualarem é muito pequena, por isso houve uma diferença em seus resultados assim, tendo a oportunidade de correlacionar ambos valores.

FIGURA 38 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA VIZINHO MAIS PRÓXIMO EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 3



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 39 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA 2-OPT EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 2



Fonte: Autor (2022).

Na TABELA 8 é possível ver o roteiro otimizado através do cálculo das heurísticas.

TABELA 8 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTЕIRO 3

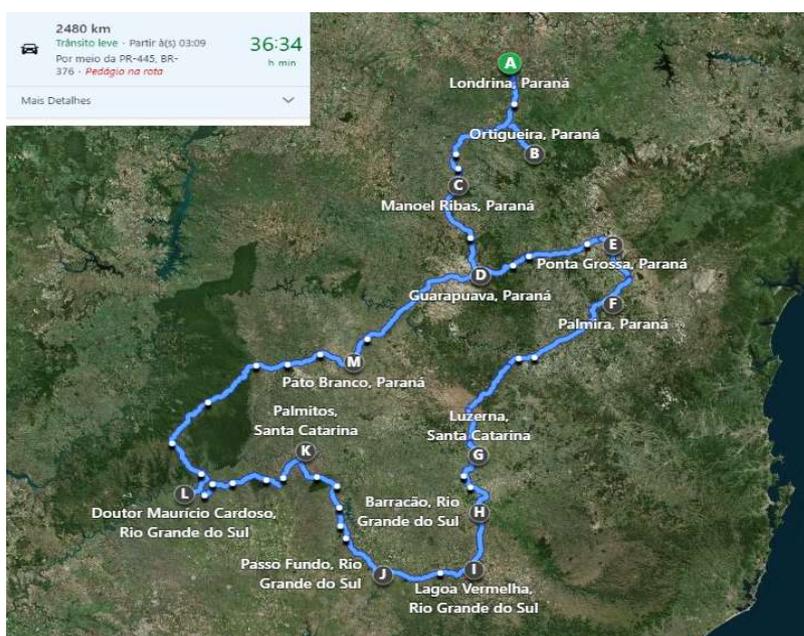
Vizinho mais próximo													
0	12	1	2	11	10	9	8	7	6	4	5	3	0
2-Opt													
0	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Fonte: Autor (2022).

Pode-se observar que ambos roteiros tiveram um resultado muito diferente, sendo um exemplo crucial para a análise funcional comparado ao roteiro atual. O principal objetivo é otimizar as rotas, logo quanto maior a variação dos roteiros, maior as chances de encontrarmos um melhor valor e por se tratar de uma rota bem extensa, é possível enxergar o impacto de tais resultados em sua parametrização.

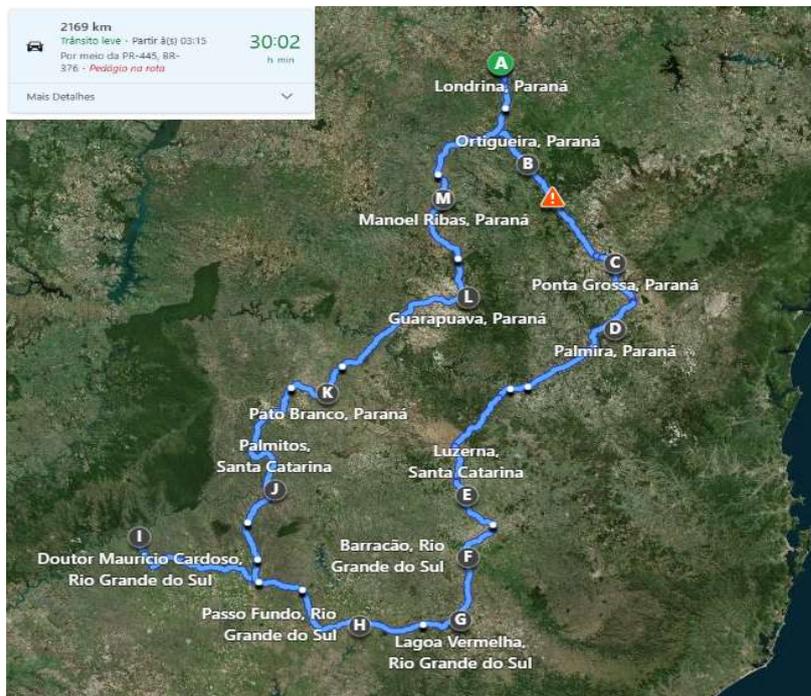
A FIGURA 40 e FIGURA 41 exemplificam a parametrização do Roteiro 3.

FIGURA 40 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO PARA O ROTЕIRO 3



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 41 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 2-OPT PARA O ROTEIRO 3

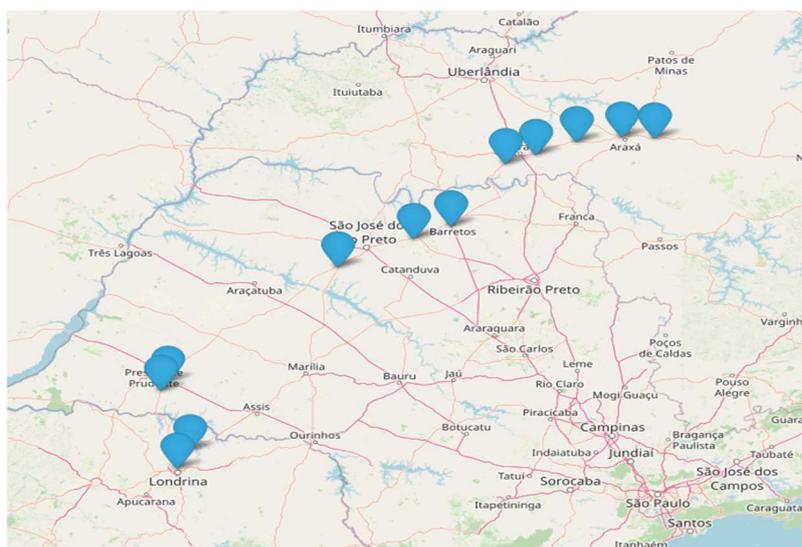


Fonte: Autor (2022).

4.4.4 Roteiro 4

Na FIGURA 42 pode-se visualizar os locais definidos através da biblioteca *Folium* referente ao Roteiro 4.

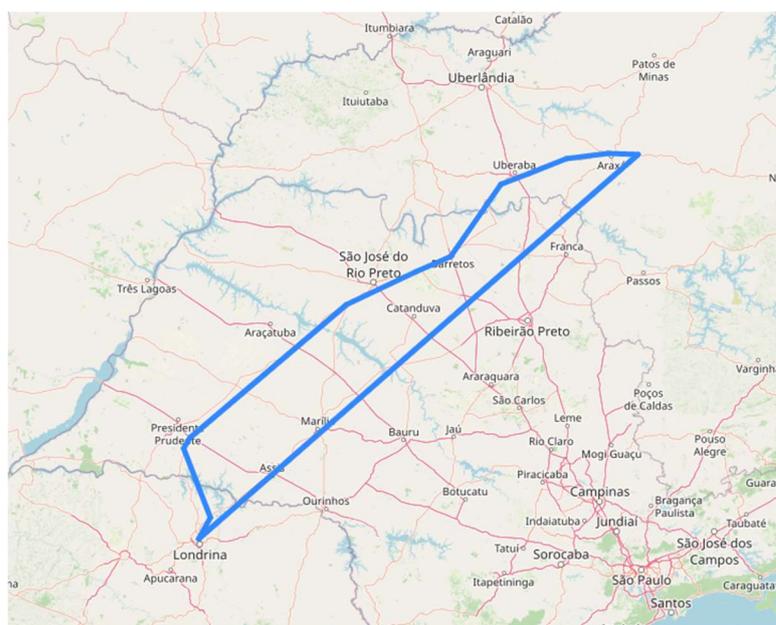
FIGURA 42 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 4



Fonte: Autor (2022).

Na FIGURA 43 pode-se entender através da imagem, a ligação dos arcos em linha reta impressa através da biblioteca *Folium*, e após o cálculo das heurísticas Vizinho mais próximo e 2-Opt. Neste caso, por se tratar de um roteiro com um comportamento bem linear, há grandes chances das heurísticas se igualarem nos resultados, é possível então classificar essa rota como de difícil otimização.

FIGURA 43 – SOLUÇÃO DAS HEURÍSTICAS EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 4



Fonte: Autor (2022).

Na TABELA 9 podemos visualizar o roteiro otimizado através do cálculo das heurísticas.

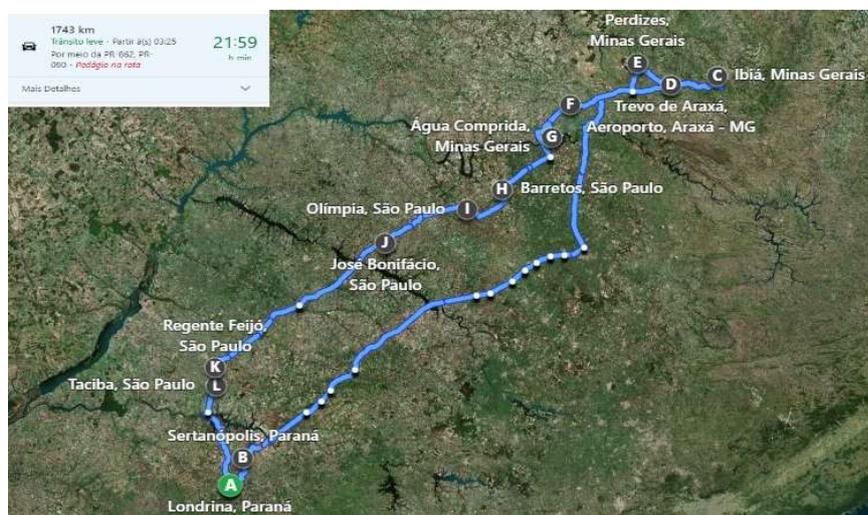
TABELA 9 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 4

Vizinho mais próximo												
0	11	7	6	8	5	4	9	3	2	1	10	0
2-Opt												
0	11	7	6	8	5	4	9	3	2	1	10	0

Fonte: Autor (2022).

A FIGURA 44 representa a parametrização das rotas para ambas heurísticas por se tratar do mesmo roteiro otimizado.

FIGURA 44 – PARAMETRIZAÇÃO DO ROTEIRO 4

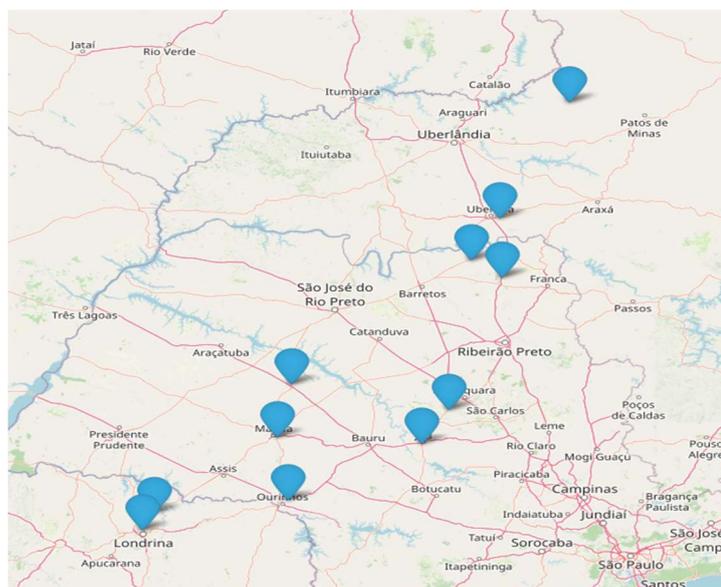


Fonte: Autor (2022).

4.4.5 Roteiro 5

Na FIGURA 45 a imagem mostra os locais definidos através da biblioteca *Folium* referente ao Roteiro 5.

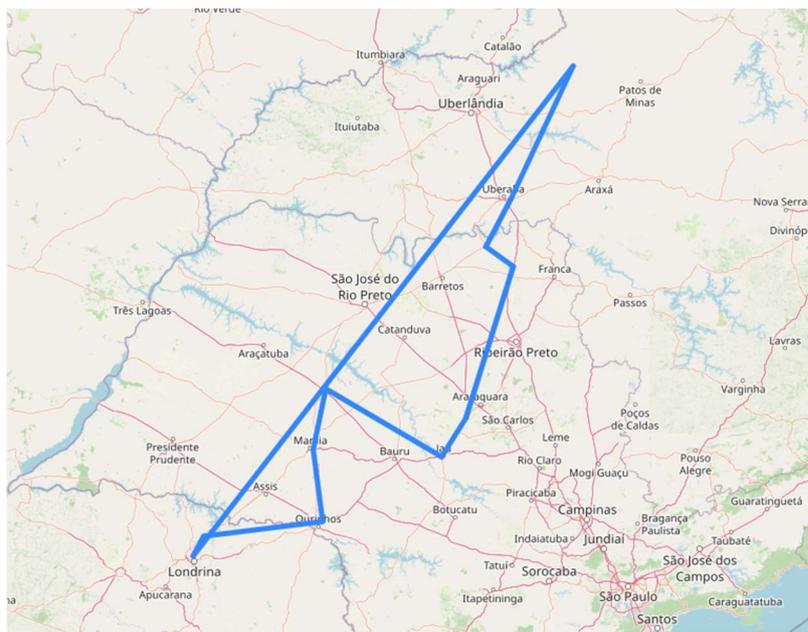
FIGURA 45 – LOCAIS DEFINIDOS PARA O ROTEIRO 5



Fonte: Autor (2022).

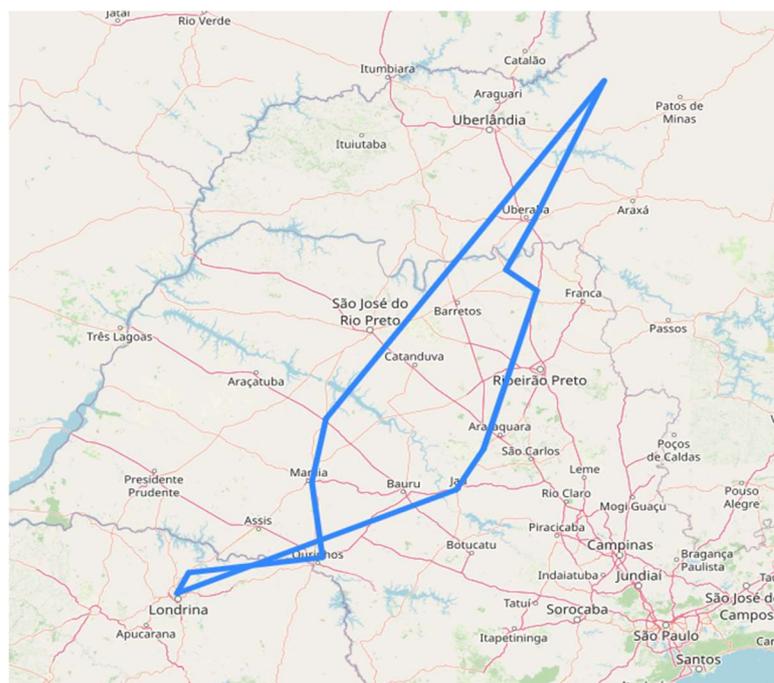
A FIGURA 46 e FIGURA 47 representam os arcos interligados para cada solução heurística proposta.

FIGURA 46 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA VIZINHO MAIS PRÓXIMO EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 5



Fonte: Autor (2022).

FIGURA 47 – SOLUÇÃO HEURÍSTICA 2-OPT EM LINHA RETA PARA O ROTEIRO 3



Fonte: Autor (2022).

Na TABELA 10 podemos visualizar o roteiro otimizado através do cálculo das heurísticas.

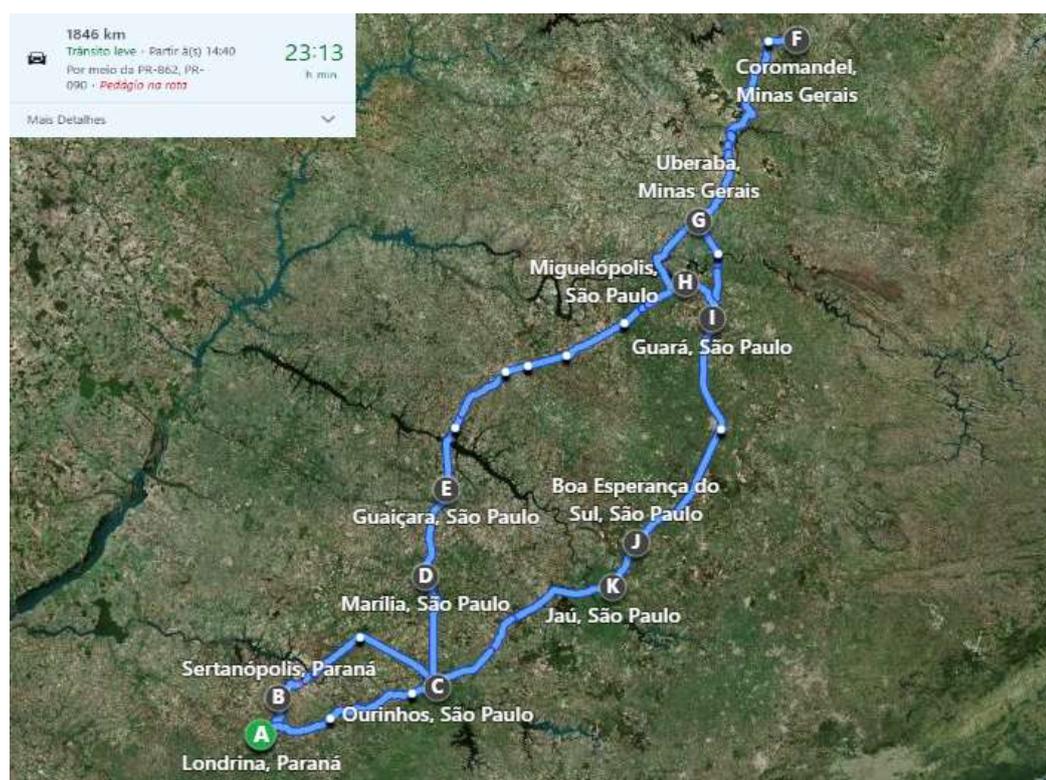
TABELA 10 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEROIO 5

Vizinho mais próximo											
0	10	1	2	3	6	5	4	7	8	9	0
2-Opt											
0	10	2	3	4	5	6	7	8	9	1	0

Fonte: Autor (2022).

A FIGURA 48 exemplifica a parametrização do Roteiro 5 otimizado via método do Vizinho mais próximo.

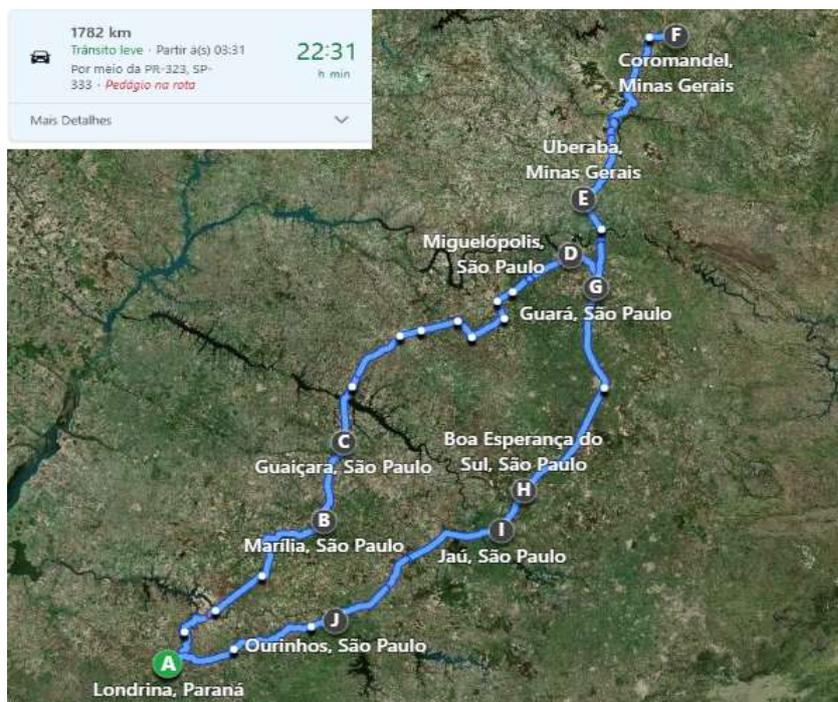
FIGURA 48 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO VIZINHO MAIS PRÓXIMO PARA O ROTEROIO 5



Fonte: Autor (2022).

A FIGURA 49 exemplifica a parametrização do Roteiro 5 otimizado via método do 2-Opt.

FIGURA 49 – PARAMETRIZAÇÃO DA SOLUÇÃO 2-OPT PARA O ROTЕIRO 5



Fonte: Autor (2022).

4.5 ANÁLISE DOS INDICADORES E DISCUSSÕES FINAIS

O último tópico desta monografia é destinado à análise de alguns indicadores que foram desenvolvidos mediante a necessidade da visualização dos resultados obtidos. Através destes indicadores pode-se assimilar algumas conclusões perante tais comparações advindas dos resultados, correlação das heurísticas propostas e apresentação das reduções obtidas para cada roteiro. Isso pode ser visualizado através da TABELA 11.

TABELA 11 – RESULTADO DAS HEURÍSTICAS

Roteiros	Atual	Vizinho mais próximo	2-Opt
<i>Roteiro 1</i>	1770km	1494km	1494km
<i>Roteiro 2</i>	540km	479km	480km
<i>Roteiro 3</i>	2854km	2480km	2169km
<i>Roteiro 4</i>	1830km	1743km	1743km
<i>Roteiro 5</i>	1949km	1846km	1782km

Fonte: Autor (2022).

Pode-se concluir que em todos os roteiros o algoritmo conseguiu calcular uma redução na distância em quilometragem. Para isto foi desenvolvido uma tabela com a intenção de exemplificar de forma estatística a redução da distância percorrida em cada roteiro.

Para a construção da tabela foi denotado os valores de menor distância, independentemente da heurística, pois o que importa para a empresa é realmente o resultado da redução final. Todavia as heurísticas mesmo em roteiros no qual o valor foi semelhante, houve uma certa redução comparada ao estado atual.

A TABELA 12 apresenta os resultados finais de redução da distância total percorrida.

TABELA 12 – RESULTADOS FINAIS DE REDUÇÃO

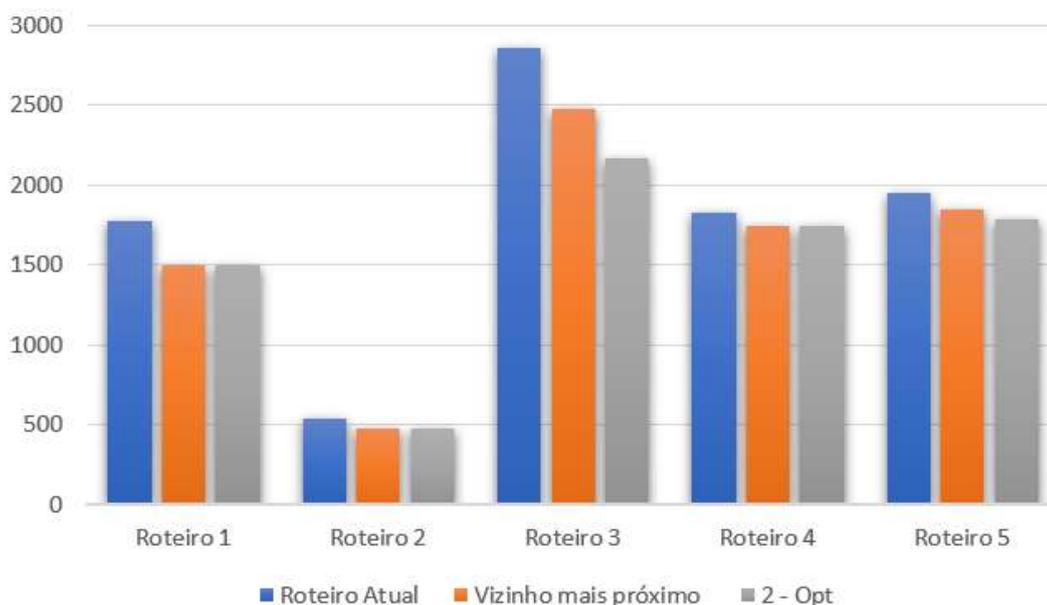
Roteiros	Antes	Depois	Redução
<i>Roteiro 1</i>	1770km	1494km	15,6%
<i>Roteiro 2</i>	540km	479km	11,3%
<i>Roteiro 3</i>	2854km	2169km	24,0%
<i>Roteiro 4</i>	1830km	1743km	4,75%
<i>Roteiro 5</i>	1949km	1782km	8,56%

Fonte: Autor (2022).

É possível observar nitidamente que houveram reduções consideráveis ao compará-los aos roteiros atuais. Os roteiros demonstraram uma variação de redução de cerca de 11% de diferença. Isso se deve ao fato da pesquisa se tratar de dados reais de uma empresa, no âmbito de aplicabilidade real dos resultados, onde se obtém roteiros que já apresentam uma certa linearidade, logo a heurística não consegue se desviar de forma exorbitante do roteiro atual da empresa. Roteiros que não apresentam linearidade em seu trajeto possuem o resultado da heurística mais evidente, ou seja, com uma tendência de maior desordem nos dados.

Na FIGURA 50 é apresentado um gráfico de barras com as quilometragens totais obtidas pelos métodos heurísticos para cada roteiro, bem como o roteiro atual utilizado pela empresa.

FIGURA 50 – CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS DAS HEURÍSTICAS



Fonte: Autor (2022).

É indubitável que, para os cinco roteiros assim representados, os métodos de resolução desse problema geraram quilometragens menores quando comparado ao roteiro atual.

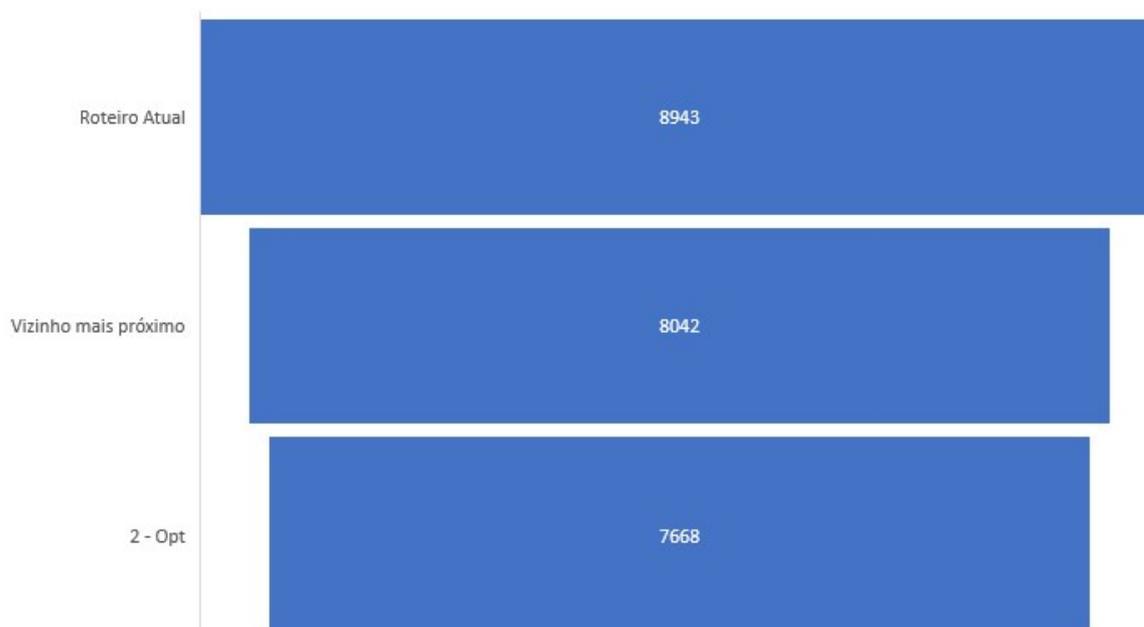
Enfatiza-se assim o melhor roteiro, que obteve a maior redução de ambas heurísticas. O Roteiro 3 por se tratar de uma viagem mais longa e que possui maior desordem em relação aos arcos, a heurística do 2-Opt resultou em uma redução de quase $\frac{1}{4}$ da viagem. Este roteiro é formidável para se utilizar como base para visualizar o quanto a heurística pode trazer resultados colossais para empresas de pequeno-médio porte. Enfatiza-se também o Roteiro 4, que comparado ao Roteiro 3 é totalmente divergente, pois a viagem que a empresa assumiu já tem um caráter de maior linearidade, onde a heurística não foi tão eficaz para os arcos disponibilizados, todavia obteve-se redução.

É nestas particularidades que uma empresa de transporte consegue atingir grandes resultados. Quando se utilizam ferramentas computacionais para o planejamento de rotas, é possível obter eficácia em grande escala em determinados romaneios, mas para outros não tanto. Neste aspecto considerando uma visão global, onde a empresa planeja várias viagens a serem feitas durante um mês de trabalho, a soma de todas essas parcelas de reduções pode trazer um grande impacto em seu custeio de transporte.

Contudo, para se obter uma análise mais precisa dos resultados das heurísticas, deve-se conter um indicador global, onde pode-se encontrar os cinco roteiros de forma abrangente, ou seja, a somatória das distâncias percorridas e os resultados das heurísticas.

Para isto foi desenvolvido um gráfico de funil, onde – se tem a comparação da quilometragem global de rodagem, representado pela soma dos cinco roteiros atuais da empresa, comparado com a soma da quilometragem dos resultados das heurísticas. Este gráfico pode ser visualizado através da FIGURA 51.

FIGURA 51 – INDICADOR GLOBAL DOS RESULTADOS



Fonte: Autor (2022).

Considerando tais resultados, pode-se estimar de forma aproximada a redução do custeio de transporte referente aos cinco roteiros estabelecidos.

Foi estabelecido por esta razão, juntamente com o gestor de frotas da empresa, as principais variáveis que afetam o custo de transporte, para cada roteiro a ser percorrido pela empresa. Nestes aspectos tem-se que os principais fatores são: o valor do combustível, pedágio nas rodovias, manutenção do veículo e custos operacionais.

Para cada variável representada temos o valor do diesel, o principal impactante, pois no contexto atual o Brasil é acometido com um acréscimo muito

elevado no preço do combustível. Em relação às rodovias pedagiadas, há pouco tempo houve um cancelamento de contrato com empresas privadas que subsidiem o processo de tráfego de veículos em praças pedagiadas, onde se ausenta as taxas durante o período de aproximadamente um ano, até o retorno dos contratos de concessão com as empresas privadas responsáveis por cada ponto do estado.

Todavia o campo de atuação da empresa é totalmente representado por entregas interestaduais, pode-se observar que apenas um dos cinco roteiros coletados representa uma viagem onde se percorre apenas cidades de nosso território estadual. As demais manutenções e operações, assim como o combustível, estão totalmente relacionadas à distância e ao tempo da viagem, pois quanto maior a distância a ser rodada pelo caminhão, maior seu custeio operacional e relativamente, mais manutenções devem ser feitas.

De acordo com o próprio romaneio assim referenciado pela FIGURA 12, neste mesmo documento onde foi possível coletar os dados da quilometragem e das cidades de entrega, o gestor de frotas também denota o valor do frete de entrega, valor no qual representa o custeio de transporte para aquele roteiro.

Através deste dado foi possível coletar o custo para cada roteiro. A TABELA 13 representa esses valores na moeda nacional, onde a empresa teve que arcar para suprir a necessidade de transportar os implementos para as cidades do roteiro.

TABELA 13 – CUSTEIO DE TRANSPORTE POR ROTEIRO

Roteiros	Antes
<i>Roteiro 1</i>	R\$ 10.462,16
<i>Roteiro 2</i>	R\$ 3.191,84
<i>Roteiro 3</i>	R\$ 18.200,00
<i>Roteiro 4</i>	R\$ 10.875,00
<i>Roteiro 5</i>	R\$ 12.862,50

Fonte: Autor (2022).

Logo, através destes dados, pode-se desenvolver um cálculo para estimar o quanto a empresa reduziria seus custos caso utiliza-se o algoritmo para seu planejamento.

Considerando os percentuais de redução em relação a distância percorrida e a distância otimizada pelos métodos heurísticos, valores representados pela TABELA 12, pode-se encontrar os valores de redução de custeio para cada roteiro. A TABELA 14 representa os valores de redução comparado com os valores atuais utilizados pela empresa.

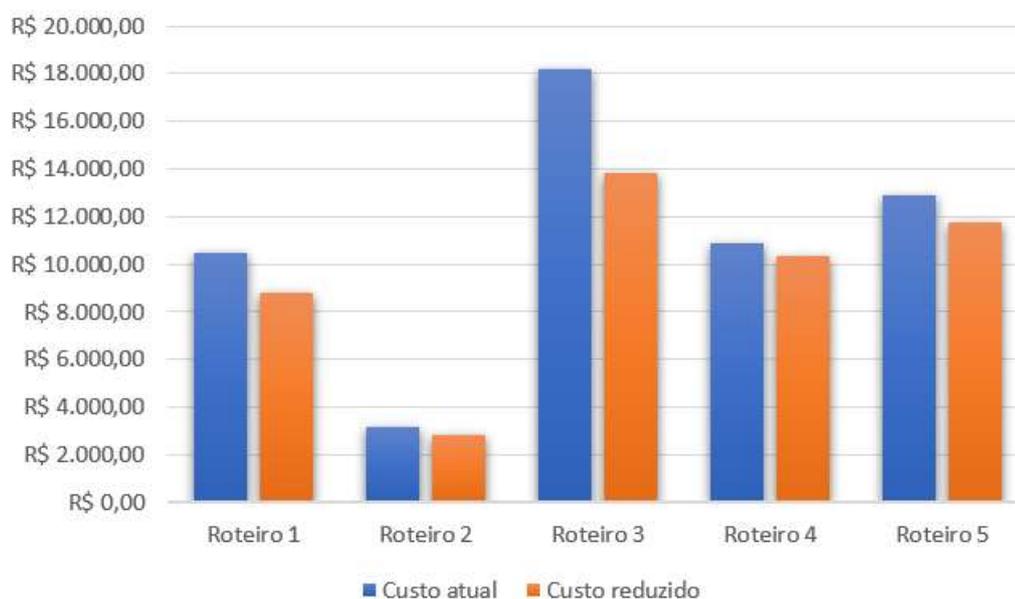
TABELA 14 – REDUÇÃO NO CUSTEIO DE TRANSPORTE POR ROTЕIRO

Roteiros	Antes	Depois
<i>Roteiro 1</i>	R\$ 10.462,16	R\$ 8.830,05
<i>Roteiro 2</i>	R\$ 3.191,84	R\$ 2.831,16
<i>Roteiro 3</i>	R\$ 18.200,00	R\$ 13.832,00
<i>Roteiro 4</i>	R\$ 10.875,00	R\$ 10.358,43
<i>Roteiro 5</i>	R\$ 12.862,50	R\$ 11.761,47

Fonte: Autor (2022).

Utilizando a mesma sistemática do Gráfico de Barras explícito na FIGURA 50, temos a FIGURA 52 que expressa os valores da TABELA 13 de forma visual, para a redução por roteiro de transporte.

FIGURA 52 – REDUÇÃO DE CUSTOS POR ROTЕIRO



Fonte: Autor (2022).

Desta forma para que a empresa pudesse 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 relativamente 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.

A TABELA 15 representa uma visão macro a respeito da economia de trajeto caso a empresa utiliza-se este meio de análise para seu planejamento.

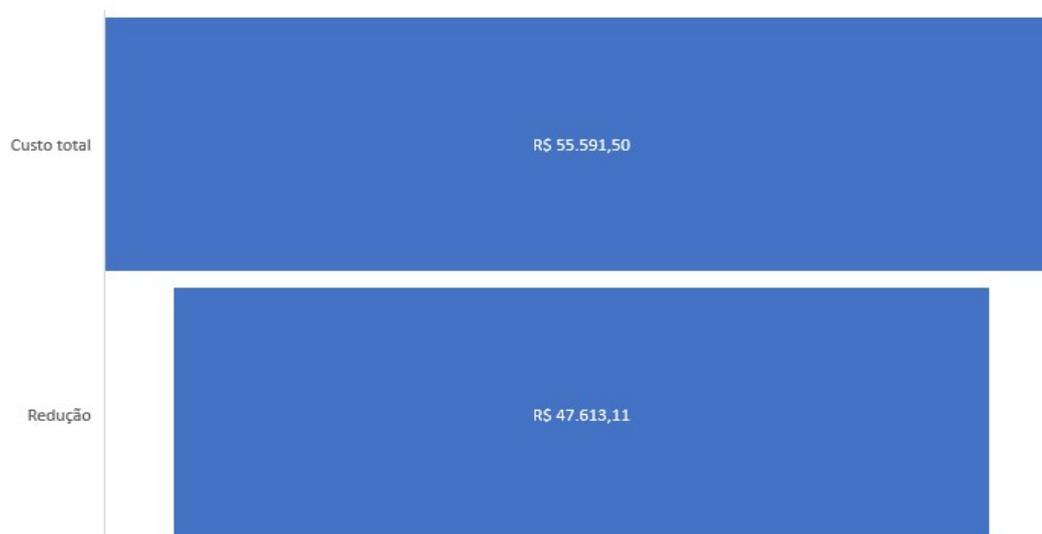
TABELA 15 – REDUÇÃO TOTAL

Total percorrido	Redução total	Redução (%)
R\$ 55.591,50	R\$ 47.613,11	14,35%

Fonte: Autor (2022).

Utilizando a mesma sistemática do Gráfico de Funil explícito na FIGURA 51, temos a FIGURA 53 que expressa os valores da TABELA 14 de forma visual, para o custeio de transporte.

FIGURA 53 – INDICADOR GLOBAL DA REDUÇÃO DE CUSTOS DE TRANSPORTE



Fonte: Autor (2022).

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa, é evidente a capacidade de gerar grandes resultados no cotidiano empresarial, utilizando ferramentas computacionais e visuais com mínimo conhecimento de linguagens de programação.

Compreender os desafios que competem às empresas de distribuição de produtos e insumos do ramo agrícola, aumenta as possibilidades desse segmento de se destacar em relação aos seus concorrentes. Considerando que um dos fatores mais custosos para empresas de pequeno-médio porte é o transporte rodoviário de seus produtos e serviços.

Adquirir conhecimento de tais ferramentas de otimização, assim como designar as melhores rotas de transporte a serem seguidas, traz consigo ganhos elevados tanto para a empresa, considerando o valor monetário agregado, quanto para o funcionário no qual é o principal fator para as tomadas de decisões da empresa, ao se pensar no fluxo de valor, tem-se que este processo de conhecimento pode impactar diretamente a empresa com o valor agregado de conhecimento advindo de seu gestor de frotas.

Ao longo desta monografia foi apresentado o Problema do Caixeiro Viajante. Um método exato de resolução e dois métodos heurísticos sendo eles o método do Vizinho mais próximo, e um algoritmo de busca local categorizado como K-opt, bem como sua aplicabilidade através de um algoritmo desenvolvido pela linguagem de programação Python, somado com a solução do solver IBM-CPLEX.

Todas as técnicas de otimização foram propostas para a resolução do problema de rotas de uma empresa do ramo de transportes de implementos agrícolas, e geraram números de quilometragem totais por roteiro melhores, ou seja, menores quando comparado aos roteiros atuais.

Isso se deve ao fato de o algoritmo apresentar um bom desempenho e aplicabilidade para empresas de pequeno-médio porte, por se tratar de bons resultados em contraste com os roteiros fornecidos, embora mais testes possam ser realizados para garantir a confiabilidade do sistema. Para a melhor eficácia em seu desempenho, será necessário a implementação de uma interface gráfica para que ocorra uma comunicação com a pessoa responsável pelo planejamento das rotas. Isso se enquadraria em uma pesquisa de desenvolvimento de software, não sendo o

caso desta pesquisa, intitulada como pesquisa para otimização que envolve tecnologias de decisão.

As abordagens quantitativas que envolvem o custeio de transporte são de caráter estatístico, de forma aproximada pode-se compreender que a empresa em sua utilização do algoritmo pode reduzir valor de custo de frete em relação a distância atual. A principal variável explícita para esta análise foi a redução da quilometragem, pois reduzindo a distância percorrida, logo impactará nos principais custos de transporte.

5 CONCLUSÃO

É nítido que o algoritmo traz resultados significativos para este ramo de atuação, todavia o trabalho se intitula na aplicação de um método, logo os resultados serão apresentados à empresa, que realizará os testes para a validação final do algoritmo, e convém da parte deles a utilização para seu planejamento de rotas.

Como resultados finais em relação a distância percorrida temos o *Roteiro 1* com cerca de 15,6% de redução, *Roteiro 2* com 11,3% de redução, *Roteiro 3* com 24% de redução, *Roteiro 4* com 4,75% de redução e *Roteiro 5* com aproximadamente 8,56% de redução da distância total percorrida.

Ambos resultados impactaram diretamente o custeio de transporte, por se tratar do maior fator abrangente ao valor do custo, para tais resultados temos: *Roteiro 1* com cerca de R\$ 1632,11 de redução, *Roteiro 2* com R\$ 360,68 de redução, *Roteiro 3* com R\$ 4368,00 de redução, *Roteiro 4* com R\$ 516,57 de redução e *Roteiro 5* com aproximadamente R\$ 1101,03 de redução em seu custeio de transporte

Em um âmbito global considerando uma empresa de pequeno porte que contenha aproximadamente cinco viagens para percorrer em um determinado período, o resultado final referente a todos os roteiros corresponde cerca de 15% da redução total percorrida em relação as viagens anteriores feitas pelos motoristas, atingindo assim aproximadamente R\$ 8000,00 de redução no custeio de transporte.

Contudo, pode-se concluir que os métodos utilizados foram eficientes, e que foi possível atingir uma solução que possibilita a otimização de rotas de entrega para empresas do ramo logístico de pequeno-médio porte.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Por se tratar de um algoritmo desenvolvido em um ambiente de código aberto, onde apenas o desenvolvedor tem o conhecimento para manipular os dados e trazer os resultados. O próximo passo da pesquisa seria o desenvolvimento de uma interface gráfica, onde o usuário que neste caso seria o gestor de frotas, pudesse se comunicar com o algoritmo e extrair os resultados dos roteiros de necessidade da empresa.

REFERÊNCIAS

Arenales, M. **Pesquisa Operacional**. Grupo GEN, 2015. 9788595155770.

Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155770/>.

Acesso em: 22 Feb 2021

BOYCHIKO, OBERDAN. **APLICAÇÃO DE MÉTODOS DA PESQUISA OPERACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE DE UMA EMPRESA DO SETOR DE EMBALAGENS DE MADEIRA**. 2019. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (GRADUAÇÃO) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2019.

CAUCHICK, Paulo. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2018.

9788595153561. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153561/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CHRISTOPHER, Martin. **O Marketing da Logística**. [S. l.: s. n.], 1997.

EG **Otimização Combinatória e Meta-heurísticas - Algoritmos e Aplicações**.

Grupo GEN, 2015. 9788595154667. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595154667/>. Acesso em: 20 de março de 2021

FÁVERO, Luiz. P. **Pesquisa Operacional - Para Cursos de Engenharia**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2012. 9788595155626. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155626/>. Acesso em: 16 nov. 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

HILLIER, Frederick. S.; LIEBERMAN, Gerald. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**.

[Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2013. 9788580551198.

Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551198/>. Acesso em: 16 nov. 2021.

H, BR **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. Grupo A, 2018. 9788560031467. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788560031467/>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2021

LONGARAY, André. A. **Introdução à Pesquisa Operacional**. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2013. 9788502210844. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788502210844/>. Acesso em: 16 nov. 2021.

Mattos, C.B.P.J.A. D. **Introdução à Logística** 1ª edição 2017. Editora Saraiva, 2019. 9788536531564. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536531564/>. Acesso em: 05 Feb 2021

NAG Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição - Estratégia, Avaliação e Operação. Grupo GEN, 2021. 9788595157217. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595157217/>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2021

O GLOBO (Brasil). G1. Gasolina nas alturas: até quando o preço do combustível vai subir? *In*: **Gasolina nas alturas: até quando o preço do combustível vai subir?** Website, 25 out. 2021. Disponível em:
<https://g1.globo.com/economia/noticia/2021/10/25/gasolina-nas-alturas.ghtml>. Acesso em: 25 out. 2021.

RUDIO, FRANZ VICTOR. **Introdução ao projeto de pesquisa científica**. Petrópolis: Editora Vozes, 1986. 143 p.