

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL OBERDAN BOYCHIKO

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DA PESQUISA OPERACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO
DE ROTAS DE TRANSPORTE DE UMA EMPRESA DO SETOR DE EMBALAGENS
DE MADEIRA

JANDAIA DO SUL

2019

GABRIEL OBERDAN BOYCHIKO

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DA PESQUISA OPERACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO
DE ROTAS DE TRANSPORTE DE UMA EMPRESA DO SETOR DE EMBALAGENS
DE MADEIRA

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

Orientador: Prof. Dr. Jair da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Luís Honigmann Cereser.

JANDAIA DO SUL

2019

Boychiko, Gabriel Oberdan
B789a Aplicação de métodos da pesquisa operacional para a otimização de rotas de transporte de uma empresa do setor de embalagens de madeira. / Gabriel Oberdan Boychiko. – Jandaia do Sul, 2019.
61 f.

Orientador: Prof. Dr. Jair da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Bruno Luís Honigmann Cereser
Trabalho de Conclusão do Curso (graduação) – Universidade Federal do Paraná. Campus Jandaia do Sul. Graduação em Engenharia de Produção.

1. Pesquisa operacional. 2. Problema do Caixeiro Viajante. 3. Linguagem de programação Julia. 4. Rotas de transporte. 5. Embalagens de madeira. I. Silva, Jair da. II. Cereser, Bruno Luís Honigmann. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD: 658.5



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PARECER Nº 015/2019/UFPR/R/JA
PROCESSO Nº 23075.079917/2019-87
INTERESSADO: **GABRIEL OBERDAN BOYCHIKO**
ASSUNTO: TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

Título: APLICAÇÃO DE MÉTODOS DA PESQUISA OPERACIONAL PARA A OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE DE UMA EMPRESA DO SETOR DE EMBALAGENS DE MADEIRA.
Autor(a): **Gabriel Oberdan Boychiko**

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)
Juliana Verga Shirabayashi
William Rodrigues dos Santos



Documento assinado eletronicamente por **JULIANA VERGA SHIRABAYASHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2019, às 16:00, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2019, às 16:04, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JAIR DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/12/2019, às 16:32, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador 2372734 e o código CRC 6AB5D02D.

A meus pais.
Meus maiores exemplo de vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus primeiramente por me dar mais essa grande conquista.

Agradeço ao apoio fantástico dos meus pais, Donato Boychiko e Elizeth Alves de Mello Boychiko, que me deram a melhor educação que um filho pode receber, e não falo somente sobre estudo, mas sim por tudo que fizeram para que eu tivesse as melhores possibilidades de ingresso em uma universidade pública. Agradeço profundamente aos dois.

Meus sinceros agradecimentos a meu orientador, Prof. Dr. Jair da Silva, pelo apoio, orientação e compreensão durante a execução desse trabalho. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Bruno Luís Honigmann Cereser, pela disposição e pela grande ajuda ao longo desse ano.

Agradeço muito a toda a equipe da UAPS/PRAE de Jandaia do Sul que sempre foram muito solícitos e me ajudaram ao longo desses últimos anos. Sem vocês certamente essa trajetória não teria sido possível.

De uma maneira bem especial quero agradecer aos professores/professoras Juliana Verga Shirabayashi, Marco Aurélio Reis dos Santos, Willian Rodrigues dos Santos, André Luiz Gazoli de Oliveira, Rafael Germano Dal Molin Filho, Janete de Paula Ferrareze Silva, Lucilene Lusia Adorno de Oliveira, Osvaldo Guedes Filho, Renata Bachin Mazzini Guedes e Raimundo Alberto Tostes, que são pessoas que eu tive o privilégio de conhecer durante a graduação, e mais do que excelentes docentes, são exemplos de pessoas que marcaram a minha graduação e que recebem minha admiração e respeito.

E para todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a execução desse trabalho.

A todos, de coração, muito obrigado!

“Os nossos sonhos e conquistas nascem com a procura. A realização só se concretiza através da persistência e coragem em realizá-lo.”

Elizeth Alves de Mello Boychiko

RESUMO

O cenário competitivo entre as organizações faz com que elas se mobilizem e deem mais atenção a pontos estratégicos para se destacarem dos seus concorrentes, é nesse contexto que a logística surge como destaque. Um dos maiores desafios dos pequenos e médios empresários mostrado em 2015, segundo o SEBRAE, está nos altos custos de distribuição dos seus produtos. Por isso uma possibilidade para solucionar esse desafio é a utilização de métodos da Pesquisa Operacional que auxiliam na determinação de melhores rotas, que pode ser obtida por meio do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Este trabalho apresenta uma análise quantitativa de como a utilização de métodos de otimização podem reduzir as quilometragens totais de rodagem, tal problema foi abordado com um Problema do Caixeiro Viajante (PCV) aplicado em uma empresa do setor de embalagens de madeira, que deseja melhorar a eficiência operacional de suas entregas. O PCV tem como objetivo encontrar a melhor rota de distribuição de um produto passando por n locais e retornar ao ponto inicial, sem visitar duas vezes o mesmo local. Para a realização de todos os cálculos necessários nesse trabalho de otimização, foi utilizada a linguagem de programação Julia, que é uma plataforma *open source* de alto desempenho para problemas dessa natureza. Como resultados, após a aplicação das técnicas de otimização advindas do problema do PCV, verificou-se uma redução de 43,3% de quilometragem total de rodagem, além da redução das distâncias, uma análise posterior mostrou que houve também uma redução de 40,2% da emissão de CO₂ equivalente, que são os gases causadores do efeito estufa. A partir desses resultados, pode-se concluir que as técnicas de otimização ajudam a diminuir os custos logísticos. É importante frisar que o estudo dessa técnica oferece, aos gestores das empresas, oportunidades para se tomar melhores decisões em termos estratégicos, para que a distribuição de seus produtos ocorra de maneira eficiente.

Palavras-chave: 1. Pesquisa Operacional. 2. Problema do Caixeiro Viajante. 3. Linguagem de programação Julia. 4. Rotas de transporte. 5. Embalagens de Madeira.

ABSTRACT

The competitive scenario among organizations causes them to mobilize and pay more attention to strategic points to stand out from their competitors, it is in this context that logistics appears as a highlight. One of the biggest challenges of small and medium-sized entrepreneurs shown in 2015, according to SEBRAE, is the high distribution costs of their products. Therefore, a possibility to solve this challenge is the use of Operational Research methods that assist in the determination of better routes, which can be obtained by means of the Traveling Salesman Problem (TSP). This paper presents a quantitative analysis of how the use of optimization methods can reduce the total mileage of treading, such a problem was addressed with a Traveling Salesman Problem (TSP) applied in a company in the wood packaging sector, which aims to improve the operational efficiency of its deliveries. The TSP aims to find the best distribution route of a product passing through n locations and return to the starting point, without visiting twice the same location. For the accomplishment of all the necessary calculations in this optimization work was used the programming language Julia, which is an open source platform of high performance for problems of this nature. As a result, after the application of the optimization techniques arising from the TSP method, there was a reduction of 43.3% in total mileage. In addition to the reduction of distances, a later analysis showed that there was also a reduction of 40.2% of the equivalent CO₂ emission, which are the gases that cause the study effect. From these results, it can be concluded that optimization techniques help to reduce logistics costs. It is important to stress that the study of this technique offers business managers opportunities to make better decisions in strategic terms, so that the distribution of their products takes place efficiently.

Keywords: 1. Operational Research. 2. Traveling Salesman Problem. 3. Julia programming language. 4. Transportation routes. 5. Packaging of Wood.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO DOS ROTEIROS PROPOSTOS.....	23
FIGURA 2 - SIMULAÇÃO DA ROTA 1.....	24
FIGURA 3 - SIMULAÇÃO DA ROTA 2.....	25
FIGURA 4 - SIMULAÇÃO DA ROTA 3.....	25
FIGURA 5 - SIMULAÇÃO DA ROTA 4.....	26
FIGURA 6 - SIMULAÇÃO DA ROTA 5.....	27
FIGURA 7 - SIMULAÇÃO DA ROTA 6.....	28
FIGURA 8 - EXEMPLO DE ÁRVORE DE SOLUÇÃO <i>BRANCH AND BOUND</i>	30
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO NEAREST NEIGHBOR.....	32
FIGURA 10 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA DO <i>NEAREST</i> <i>NEIGHBOR</i>	33
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO <i>FARTHEST-</i> <i>INSERTION</i>	34
FIGURA 12 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA DO CHEAPEST INSERTION.....	35
FIGURA 13 - SOLUÇÃO AJUSTADA PELO K-OPT.	36
FIGURA 14 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.	38
FIGURA 15 - ETAPAS DA PESQUISA.	39
FIGURA 16 - CIDADES POR ROTEIRO.....	46
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS OTIMIZADAS VERSUS A DISTÂNCIA USADA ATUALMENTE (POR ROTA).....	50
FIGURA 18 - QUILOMETRAGEM TOTAL DE RODAGEM (POR MÉTODO DE SOLUÇÃO) VERSUS ATUAL.	51
FIGURA 19 - COMPARAÇÃO DO ROTEIRO 1 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA. ...	53
FIGURA 20 - COMPARAÇÃO DO ROTEIRO 2 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA. ...	54
FIGURA 21- COMPARAÇÃO DO ROTEIRO 3 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA.	55
FIGURA 22 - COMPARAÇÃO DO ROTEIRO 4 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA. ...	56
FIGURA 23 - COMPARAÇÃO DO ROTEIRO 5 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA. ...	57

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – RESUMO DE SIMULAÇÃO PARA RESOLUÇÃO DO PCV.....	28
QUADRO 2 – TRABALHOS QUE UTILIZAM MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.....	36
QUADRO 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS ROTEIROS DA EMPRESA.....	42
QUADRO 4 - ROTEIRO 1 USADO PELA EMPRESA.....	42
QUADRO 5 - ROTEIRO 2 USADO PELA EMPRESA.....	43
QUADRO 6 - ROTEIRO 3 USADO PELA EMPRESA.....	43
QUADRO 7 - ROTEIRO 4 USADO PELA EMPRESA.....	44
QUADRO 8 - ROTEIRO 5 USADO PELA EMPRESA.....	44
QUADRO 9 - SEQUÊNCIA DO ROTEIROS OTIMIZADOS VIA <i>BRANCH AND BOUND</i>	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CIDADES ESCOLHIDAS.....	22
TABELA 2 – ROTA 1 PROPOSTA.....	24
TABELA 3 – ROTA 2 PROPOSTA.....	24
TABELA 4 – ROTA 3 PROPOSTA.....	25
TABELA 5 – ROTA 4 PROPOSTA.....	26
TABELA 6 – ROTA 5 PROPOSTA.....	26
TABELA 7 – ROTA 6 PROPOSTA.....	27
TABELA 8 - QUILOMETRAGEM ATUAL PERCORRIDA (POR ROTEIRO).....	45
TABELA 9 - QUILOMETRAGEM SEGUNDO O <i>GOOGLE MAPS</i> (POR ROTEIRO).	45
TABELA 10 - QUILOMETRAGEM TOTAL DA ROTA OBTIDA PELA HEURÍSTICA <i>CHEAPEST INSERTION</i>	47
TABELA 11 - QUILOMETRAGEM TOTAL DA ROTA OBTIDA PELA HEURÍSTICA <i>NEAREST NEIGHBOR</i>	47
TABELA 12 - QUILOMETRAGEM TOTAL DA ROTA OBTIDA PELA HEURÍSTICA <i>FARTHEST INSERTION</i>	47
TABELA 13 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 1 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.....	48
TABELA 14 - SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 2 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.....	48
TABELA 15 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 3 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.....	48
TABELA 16 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 4 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.....	49
TABELA 17 - SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 5 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.....	49
TABELA 18 - QUILOMETRAGEM OTIMIZADA OBTIDA PELO MÉTODO EXATO <i>BRANCH AND BOUND</i>	49
TABELA 19 – EMISSÕES DE CO ₂ EQUIVALENTE POR QUILOMETRAGEM TOTAL DE RODAGEM.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

B&B	- <i>Branch and Bound.</i>
CNT	- Confederação Nacional dos Transportes.
IPAM	- Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia.
IPCC	- Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.
JIT	- <i>Just in Time.</i>
LLVM	- <i>Low Level Virtual Machine.</i>
MIT	- <i>Massachusetts Institute of Technology.</i>
PCV	- Problema do Caixeiro Viajante.
PIB	- Produto Interno Bruto.
PL	- Programação Linear.
PME	- Pequenas e Médias Empresas.
PO	- Pesquisa Operacional.
SEBRAE	- Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas.
TFI	- Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa.
TSP	- <i>Traveling Salesman Problem.</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	20
2.1.1 Formulação matemática do problema de programação linear	20
2.2 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE.....	21
2.2.1 Formulação matemática do problema do caixeiro viajante.....	22
2.3 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE - PCV	29
2.3.1 Métodos exatos	29
2.3.1.1 <i>Branch and Bound (B&B)</i>	30
2.3.2 Métodos heurísticos	31
2.3.2.1 <i>Nearest Neighbor Heuristic</i>	32
2.3.2.2 <i>Farthest Insertion Heuristic</i>	34
2.3.2.3 <i>Cheapest Insertion Heuristic</i>	34
2.3.2.4 <i>K-opt</i>	35
2.4 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO JULIA.....	37
3 PROCEDIMENTO METODOLOGICOS	38
3.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA.....	38
3.2 ABORDAGEM METODOLOGICA.....	39
3.2.1 Definição do problema e formulação da modelagem matemática.	39
3.2.2 Coleta de dados e construção da matriz distâncias.	40
3.2.3 Interpretação dos dados obtidos da utilização do <i>JuliaBox</i> e de planilhas eletrônicas.	40
3.2.4 Hipóteses do trabalho.....	40
3.3 DESCRIÇÃO DO CASO.....	40
4 O CENÁRIO ATUAL DA EMPRESA	42
4.1 ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADAS PELA EMPRESA	42
5 RESULTADOS OBTIDOS E SUAS ANÁLISES	47

5.1 REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO ₂ COM A OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS	58
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

O cenário competitivo entre as organizações, faz com que elas se mobilizem e deem mais atenção a pontos estratégicos para se destacarem dos seus concorrentes, um dos principais pontos estratégicos é a logística (LOUCANOVÁ et al, 2016). Isso se dá porque, segundo mostra os dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT), o transporte rodoviário de produtos é um dos fatores mais custosos para as empresas.

Para Rosa (2007), o tempo de transporte de um produto pode ser um qualificador de pedidos, ou seja, o produto que consegue chegar mais rápido ao consumidor muitas vezes se sobressai até mesmo aos produtos mais baratos. Outro ponto a ser destacado é que a qualidade do serviço prestado torna a logística das empresas um diferencial de mercado.

Como pode ser visto em Daskin (1985), Ballou (2004), Novaes (2015), Bertaglia (2016), a logística é definida como o planejamento e a operação dos sistemas físicos, informacionais e gerenciais que são necessários para que os insumos e produtos vençam os condicionantes espaciais e temporais de forma econômica, e assim, cumpram com um dos seus principais objetivos, que é entregar nos locais certos, quando são desejados e com o menor custo para os consumidores (BOWERSOX et al, 1996). Para a Confederação Nacional do Transporte (CNT), o transporte logístico é a plataforma que conecta os diferentes setores produtivos, e é o responsável por tornar possível os fluxos que mantêm o ritmo e o dinamismo das cadeias produtivas. Isso porque o setor logístico não só contribui para o funcionamento da economia aumentando a demanda por serviços e produtos, mas é retroalimentado pelo seu bom desempenho.

O Plano Nacional de Transporte e Logística, formulado pela CNT, mostra que os custos logísticos envolvidos na distribuição de produtos representam 11,6% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (MARTINS, 2017). Com isso, o gerenciamento logístico, que é focado na redução dos custos de transporte, surge como uma nova ferramenta e tem o objetivo de oferecer ao gestor da empresa os parâmetros que possibilitem uma melhor tomada de decisão (ROSA, 2007). Nesse contexto, existem vários métodos de otimização que visam melhorar os índices nas áreas de transporte, dentre eles destaca-se o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), que é um problema

de otimização combinatória utilizado para a determinação das melhores rotas de transporte.

Hoje o maior percentual das empresas no mercado brasileiro são pequenas ou médias empresas (PME). Segundo pesquisa do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), em 2015 as PME eram o segmento responsável por 27% do PIB brasileiro.

Vale ressaltar que uma característica importante da PO é que ela facilita o processo de análise e de tomada de decisão por meio de métodos, que na prática significa simular efetivamente um modelo antes dele ser implantado na empresa. Isso gera economias e justifica o uso da PO.

No foco desse trabalho está uma empresa de médio porte do setor de embalagens de madeira, que deseja reorganizar as suas rotas de transporte de modo a garantir uma melhor utilização do seu caminhão. Diante disso, a ideia fundamental desse trabalho é mostrar ao gestor da empresa que existem métodos de otimização que designam melhores rotas de transporte e ainda resultam em menores custos para a empresa, e assim responder a seguinte pergunta: Qual é o melhor roteiro a ser percorrido de modo a reduzir as distâncias totais das entregas?

1.1 JUSTIFICATIVA

Um dos fatores que contribuem para a busca por melhores resultados, é garantir que o transporte de produtos para os clientes finais seja feito de forma mais eficiente.

Os desafios da distribuição de produtos e serviços por meio rodoviário, é uma das variáveis que mais impactam no custo final dos produtos e que acaba sendo repassado para os consumidores (RODRIGUES, 2007).

Partindo desse pressuposto, a relevância acadêmica desse trabalho está no fato de que as empresas de médio porte em sua maioria, são carentes de métodos que as auxiliem de alguma forma a tomarem decisões mais assertivas de como designar melhores rotas de transporte para seus produtos ou serviços, sem contar que a utilização desses métodos gera a oportunidade de aplicar e gerar novos conhecimentos sobre PO.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos desta monografia estão divididos a seguir em geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Diante da problemática apresentada, o objetivo geral deste trabalho é encontrar as melhores rotas de transporte e distribuição dos produtos fabricados por uma empresa do setor de embalagens de madeira, de modo a reduzir a distância total de entrega dos produtos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão descritos a seguir:

- a) Identificar os problemas relacionados ao transporte da empresa;
- b) Estudar os diferentes métodos exatos e heurísticos e a linguagem de programação Julia;
- c) Realizar o levantamento dos dados de transporte com as coordenadas geográficas de cada ponto a ser visitado;
- d) Formular um modelo matemático para solucionar os problemas identificados;
- e) Calcular as várias possibilidades de rotas para o problema identificado, utilizando a plataforma *JuliaBox* e a linguagem de programação Julia, com o pacote *TravelingSalesmanHeuristics*;
- f) Propor soluções viáveis para o problema identificado com base na análise de diferentes cenários com diferentes métodos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em 6 capítulos, estruturado da seguinte maneira:

O capítulo 1 apresenta o contexto da Pesquisa Operacional (PO) e dos problemas de transporte. Discute o Problema do Caixeiro Viajante, como um método de resolução para problemas de rotas, e traz também o problema da empresa em questão a ser estudado nesse trabalho, a justificativa e os objetivos.

O capítulo 2 traz a revisão de literatura, onde são abordados os conceitos que embasam o Problema do Caixeiro Viajante, como um problema de programação linear. Outro aspecto importante desse capítulo consiste na apresentação das formas de resolução do PCV que estão divididos em métodos exatos, como o *Branch and Bound*, e métodos heurísticos, como as heurísticas de *Cheapest Insertion*, *Nearest Neighbor* e *Farthest Insertion*.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para a resolução do problema e o enquadramento desse trabalho.

No capítulo 4 é descrito qual a problemática da empresa que é o foco desse trabalho, e ainda é apresentado quais são as rotas atualmente utilizadas pela empresa para a entrega dos seus produtos.

No capítulo 5 é apresentado a análise dos resultados, a representação gráfica na forma de um mapa da solução proposta comparada com a utilizada atualmente pela empresa, e quais os ganhos gerados. Nesse capítulo também é mostrado qual a redução do impacto ambiental pelas novas rotas de transporte.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais diante das análises dos resultados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo traz os conceitos e métodos de resolução utilizados na abordagem do Problema do Caixeiro Viajante estudado, através de uma breve introdução teórica.

2.1 PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

A Programação Linear (PL) surgiu em 1941 como uma técnica de planejamento, sendo um dos tópicos da Pesquisa Operacional (PO). A PO tem a sua origem durante os anos da segunda grande guerra, onde era utilizada para solucionar problemas logísticos bélicos, fazendo pesquisas com fundamentos científicos destinados a orientar as ações militares (PRADO, 2016).

Estudos recentes, como visto em Junqueira (2006) e Melo (2017), têm mostrado que a Programação Linear é hoje uma das técnicas mais utilizadas dentro da Pesquisa Operacional, e é muito comum ver suas aplicações fazendo parte da rotina de planejamento de várias empresas.

Na prática, a Programação Linear tem sido aplicada nas mais diferentes áreas, como alimentícia, manufatura, siderurgia, agricultura, transportes, entre outras.

2.1.1 Formulação matemática do problema de programação linear

Os problemas de otimização como os de Programação Linear (PL) são constituídos por uma expressão linear, denominada função objetivo, e por um conjunto de expressões lineares que formam as restrições que envolvem as variáveis de decisão. Essas restrições do problema, podem ter relação de desigualdade ou de igualdade, onde em um mesmo modelo pode conter todos os tipos de restrições (PIZZOLATO, N. D. et al, 2009).

Para simplificar a representação matemática da PL, costuma-se representar as restrições em forma de igualdade, conhecida como forma padrão. Na forma padrão, o modelo de PL consiste em escolher as variáveis de decisão X_1, X_2, \dots, X_n , a valores não negativos, dentro de uma estrutura em que se busca otimizar o valor da função objetivo Z , mas respeitando as restrições lineares:

$$\text{Max (ou Min)} \quad Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (1)$$

Sujeito a

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned} \quad (2)$$

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

Acima vemos os coeficientes de uma função objetivo (1), seguido das restrições (2) impostas por esse problema, e (3) que é a condição de não negatividade das variáveis.

Um modelo matemático do problema de Programação Linear pode ser formulado seguindo o exemplo abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & 4x + 5y \\ \text{Sujeito a} \quad & 10x + 5y \leq 100 \\ & 6x + 3y \leq 210 \\ & x, y \leq 0 \end{aligned}$$

2.2 PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV), do inglês *Traveling Salesman Problem* (TSP), é um dos problemas mais estudados em otimização combinatória (FERNANDO, 2016).

A origem do PCV é creditada a Willian Ronan Hamilton, que criou um jogo onde o objetivo era o de traçar um roteiro através dos vértices de um dodecaedro, no qual os vértices eram as cidades. Porém, além de iniciar e terminar no mesmo ponto, não se pode repetir a mesma cidade.

O PCV pode ser definido como um problema de encontrar o roteiro ideal que tenha a menor distância ou o menor custo, que passa por um conjunto de cidades.

Para Cunha (2002), sob a ótica da otimização, o PCV pertence a categoria conhecida como NP-Difícil. Em outras palavras, o esforço computacional para a

resolução do problema cresce de maneira fatorial conforme o número de variáveis do problema cresce.

2.2.1 Formulação matemática do problema do caixeiro viajante

Considere um Problema do Caixeiro Viajante que passa por n cidades uma única vez e retorna ao ponto de origem e que apresenta o seguinte modelo:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j<i} x_{ij} + \sum_{j>i} x_{ij} = 2, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$x \in B^{n(n-1)/2} \quad (3)$$

Onde os coeficientes da função (1) definem a distância total a ser minimizada. Os coeficientes da restrição (2) impõem a obrigatoriedade de se passar por todas as cidades sem repeti-la. E a restrição (3) define os tipos de variáveis.

De modo geral, para que se consiga resolver o Problema do Caixeiro Viajante, é necessário enumerar todas as soluções possíveis dentro das combinações viáveis. O número de rotas possíveis, dentro das limitações do problema, pode ser calculado usando a fórmula: $R(n) = (n - 1)!$, que na prática indica que a quantidade de rotas cresce de forma fatorial.

Para exemplificar melhor o conceito do Problema do Caixeiro Viajante, a TABELA 1 mostra um problema com quatro cidades, ou seja, $n = 4$ onde a origem é a cidade de Brasília. O caixeiro só pode passar uma única vez por cada cidade e retornar à cidade de origem.

TABELA 1 – CIDADES ESCOLHIDAS.

NÚMERO	CIDADE	ESTADO
1	Brasília	Distrito Federal
2	Padre Bernardo	Goiás
3	Goianésia	Goiás

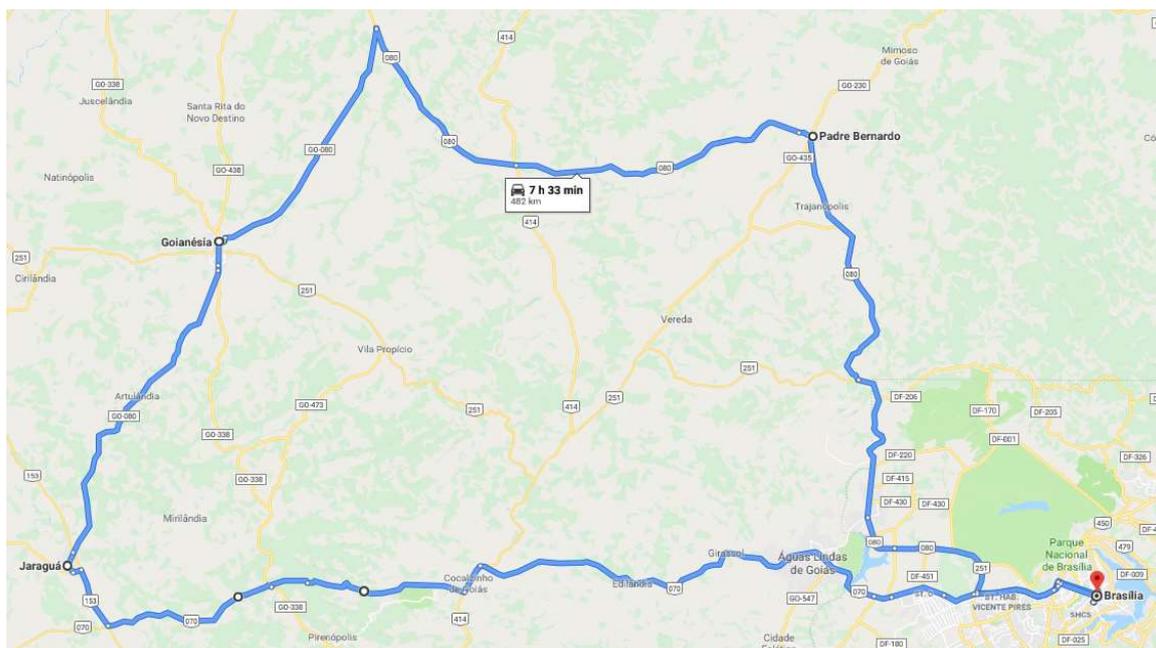
de 482 km passando por todas as cidades escolhidas, em um tempo de trajeto de 7 horas e 33 minutos realizado à carro no estado de Goiás e retornando para Brasília.

O primeiro trajeto é indicado na TABELA 2 e a simulação dessa rota pode ser visto na FIGURA 2.

TABELA 2 – ROTA 1 PROPOSTA.

BRASÍLIA PADRE BERNARDO GOIANÉSIA JARAGUÁ BRASÍLIA

FIGURA 2 - SIMULAÇÃO DA ROTA 1.



FONTE: Google Maps (2019).

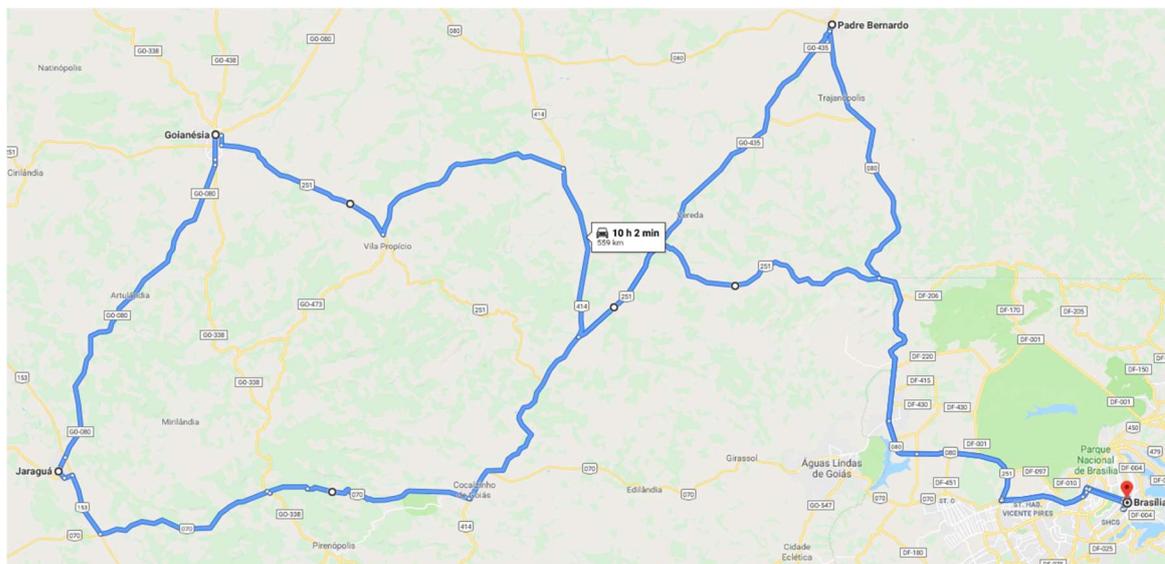
FONTE: Autor (2019).

Na TABELA 3 é apresentado o trajeto da segunda rota proposta, e que pode ser visualizada na FIGURA 3.

Desta rota, o trajeto proposto pelo *Google Maps*, tem o tempo estimado de 10 horas e 2 minutos com uma distância de 559 km, passando por todas as cidades e retornando para Brasília.

TABELA 3 – ROTA 2 PROPOSTA.

BRASÍLIA PADRE BERNARDO JARAGUÁ GOIANÉSIA BRASÍLIA

FIGURA 3 - SIMULAÇÃO DA ROTA 2.

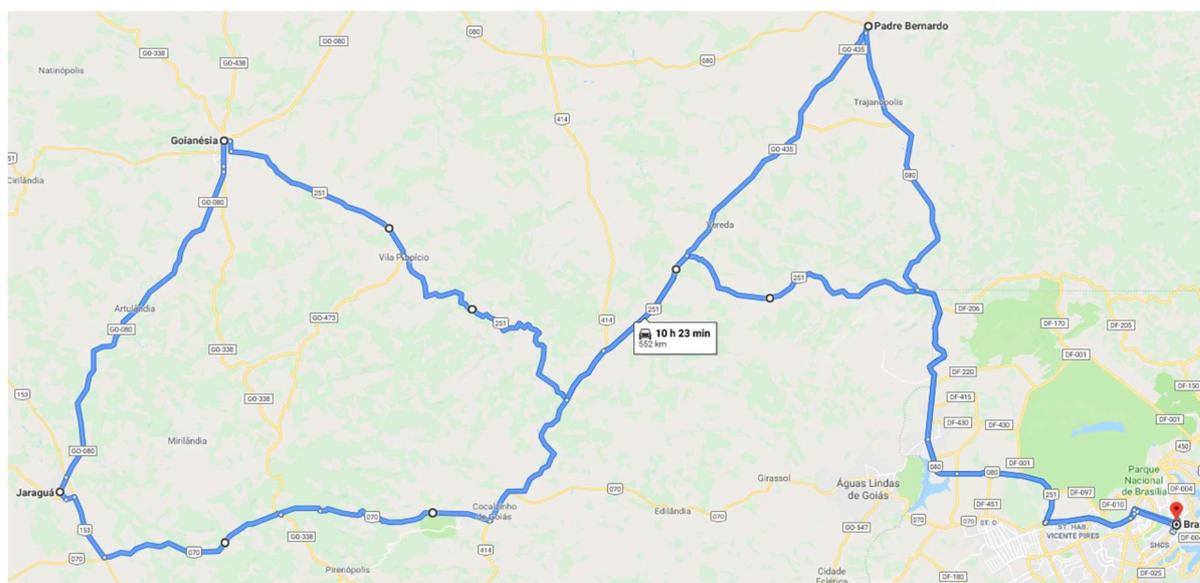
FONTE: Google Maps (2019).

FONTE: Autor (2019).

Outra possível rota é composta pelas cidades que são apresentadas no trajeto indicado na TABELA 4 e pode ser visualizado em simulação na FIGURA 4.

TABELA 4 – ROTA 3 PROPOSTA

BRASÍLIA	GOIANÉSIA	JARAGUÁ	PADRE BERNARDO	BRASÍLIA
-----------------	------------------	----------------	-----------------------	-----------------

FIGURA 4 - SIMULAÇÃO DA ROTA 3.

FONTE: Google Maps (2019).

FONTE: Autor (2019).

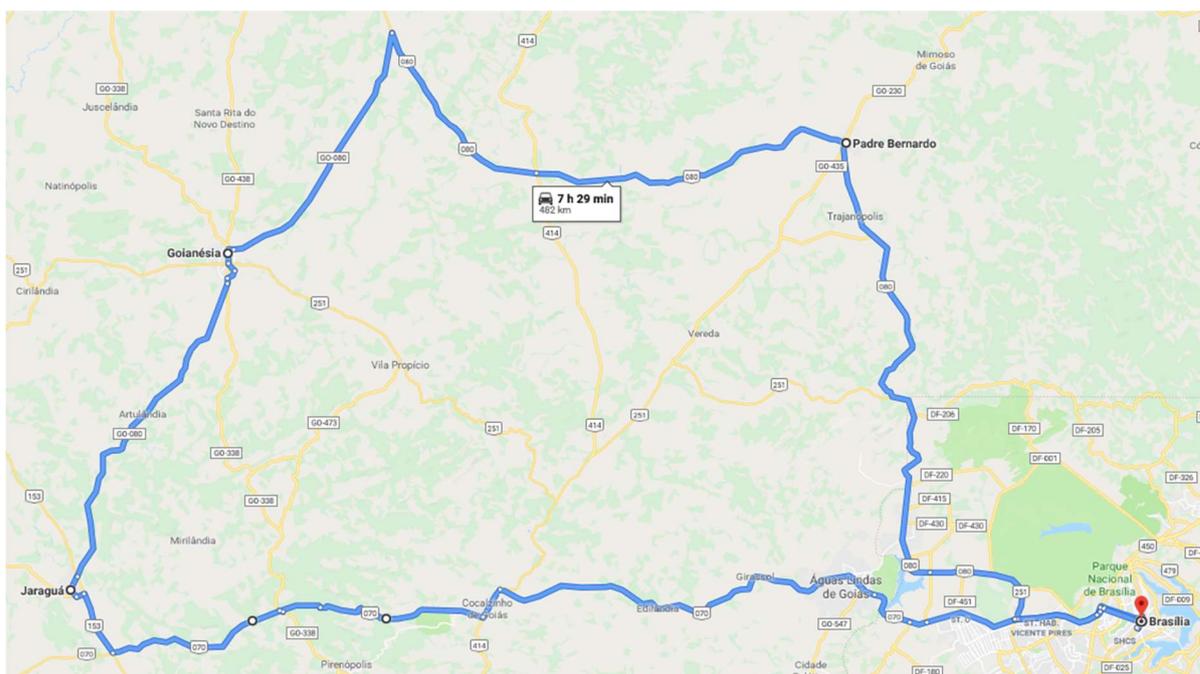
Como proposta desta rota obtida via *Google Maps*, o tempo de trajeto estimado é de 10 horas e 23 minutos com uma distância de 552 km, passando por todas as cidades e retornando para Brasília.

Uma nova rota foi proposta, em que o trajeto é indicado na TABELA 5. A quarta rota pode ser visualizada na FIGURA 5.

TABELA 5 – ROTA 4 PROPOSTA.

BRASÍLIA	JARAGUÁ	GOIANÉSIA	PADRE BERNARDO	BRASÍLIA
----------	---------	-----------	----------------	----------

FIGURA 5 - SIMULAÇÃO DA ROTA 4.



FONTE: *Google Maps* (2019).

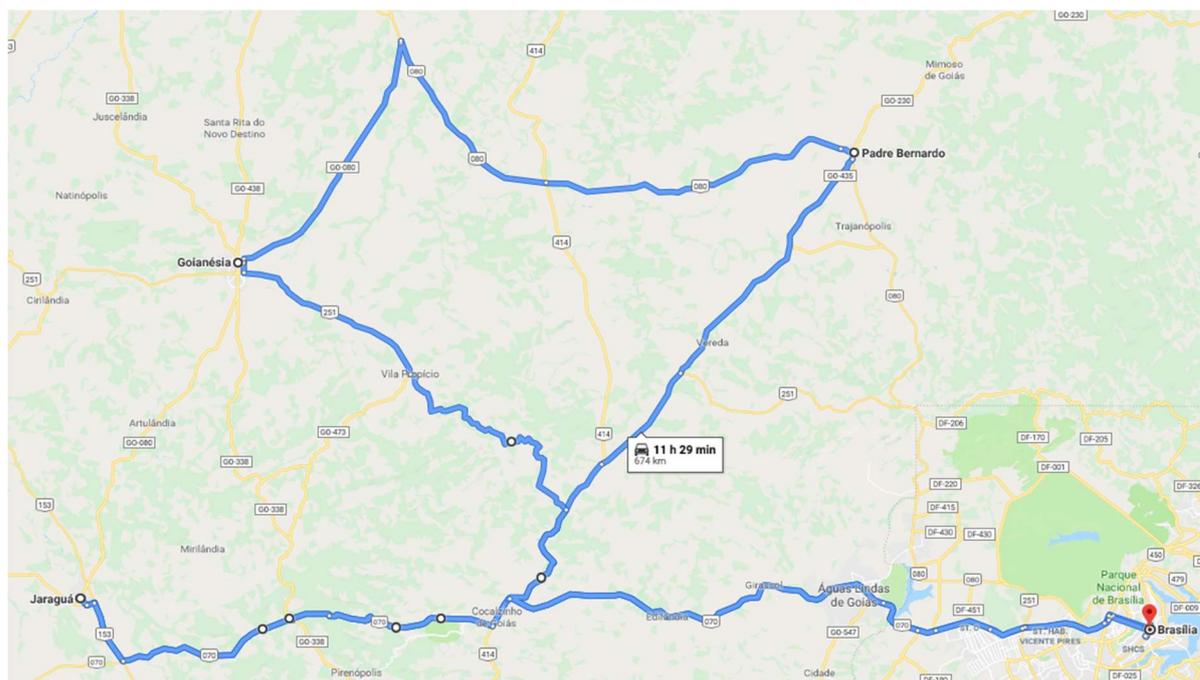
FONTE: Autor (2019).

Para a rota 4, a proposta do *Google Maps* teve um tempo de trajeto estimado de 7 horas e 29 minutos e uma distância de 482 km, passando por todas as cidades e retornando para Brasília.

Ainda com uma quinta combinação de cidades, o trajeto da rota 5 é apresentado na TABELA 6, podendo ser visualizado na FIGURA 6.

TABELA 6 – ROTA 5 PROPOSTA.

BRASÍLIA	JARAGUÁ	PADRE BERNARDO	GOIANÉSIA	BRASÍLIA
----------	---------	----------------	-----------	----------

FIGURA 6 - SIMULAÇÃO DA ROTA 5.

FONTE: Google Maps (2019).

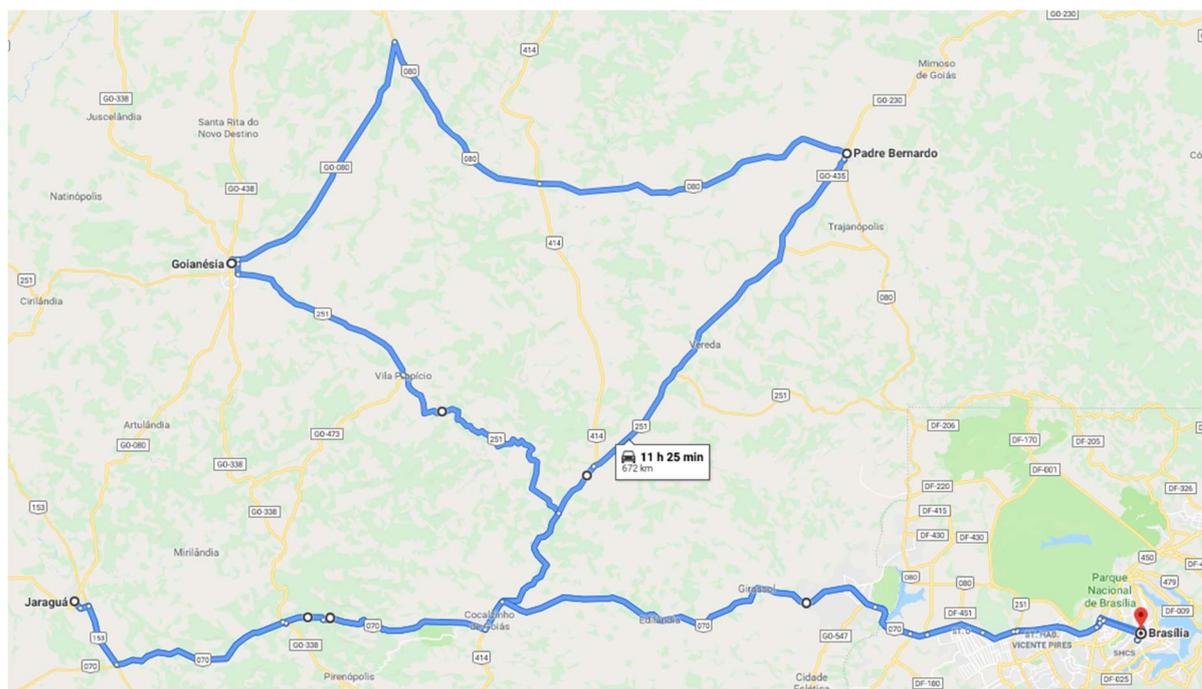
FONTE: Autor (2019).

A rota 5 obtida via *Google Maps*, possui um tempo de trajeto estimado de 11 horas e 29 minutos com uma distância de 674 km, passando por todas as cidades e retornando para Brasília.

Por fim, a rota 6 proposta, faz o trajeto indicado na TABELA 7, e pode ser visto na FIGURA 7.

TABELA 7 – ROTA 6 PROPOSTA.

BRASÍLIA	GOIANÉSIA	PADRE BERNARDO	JARAGUÁ	BRASÍLIA
-----------------	------------------	-----------------------	----------------	-----------------

FIGURA 7 - SIMULAÇÃO DA ROTA 6.

FONTE: Google Maps (2019).

FONTE: Autor (2019).

Desta rota, a proposta obtida pelo *Google Maps*, o tempo de trajeto estimado é de 11 horas e 25 minutos com uma distância de 672 km, passando por todas as cidades e retornando para Brasília.

Em resumo, as rotas, o tempo e as distâncias de cada trajeto estão apresentados no QUADRO 1.

QUADRO 1 – RESUMO DE SIMULAÇÃO PARA RESOLUÇÃO DO PCV.

	Trajeto	Tempo de Trajeto	Distância (KM)
ROTA 1	1-2-3-4-1	7h 33m	482
ROTA 2	1-2-4-3-1	10h 2m	559
ROTA 3	1-3-4-2-1	10h 23m	552
ROTA 4	1-4-3-2-1	7h 29m	482
ROTA 5	1-4-2-3-1	11h 29m	674
ROTA 6	1-3-2-4-1	11h 25m	672

FONTE: Autor (2019).

Analisando o QUADRO 1, vemos que a rota 1 e a rota 4 obtiveram as menores distâncias de rodagem se comparada as demais rotas, e portanto são as melhores, e estão empatadas dentro da margem de erro. Logo, as rotas 1 e 4 são as melhores propostas de transporte para o exemplo apresentado.

2.3 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE - PCV

Para a resolução do Problema do Caixeiro Viajante, a solução pode ser classificada como sendo exata ou heurística. Para Cunha (2002), os métodos exatos baseiam-se em enumeração implícita em árvore, ou *Branch and Bound* (B&B) como são conhecidos. Os trabalhos de Laporte (2000), Helsgaun (2000) e Mestria (2014) apresentam maiores detalhes sobre os métodos exatos.

Vale destacar que os métodos exatos têm aplicação limitada para a solução do PCV, tendo em vista a complexidade intratável, ou seja, que não existe um algoritmo polinomial para resolver este problema em tal método (MORABITO, 2006). Consequentemente, os métodos de solução mais aplicados para esses casos são geralmente heurísticos, isto é, não garantem encontrar uma solução ótima, mas estatisticamente geram soluções boas em um tempo adequado para as necessidades da aplicação.

Dada a importância do Problema do Caixeiro Viajante e tendo em vista a sua larga aplicabilidade, várias abordagens têm sido desenvolvidas com o propósito de se resolver esse problema com distâncias maiores. Para esse trabalho utilizaremos o método exato *Branch and Bound* e três métodos heurísticos, cada um com uma abordagem diferente que são *Cheapest Insertion*, *Nearest Neighbor* e *Farthest Insertion*.

2.3.1 Métodos exatos

Os algoritmos exatos garantem que a solução encontrada será a solução ótima, porém nos trabalhos de Golbarg (2005) e Taha (2008) é destacado que os métodos exatos de resolução, em alguns casos devido ao tamanho do problema e do alto tempo de processamento, tornam-se inviáveis de se obter uma solução.

Dentre os métodos exatos mais utilizados e que são baseados em programação inteira destaca-se o *Branch and Bound*.

2.3.1.1 *Branch and Bound (B&B)*

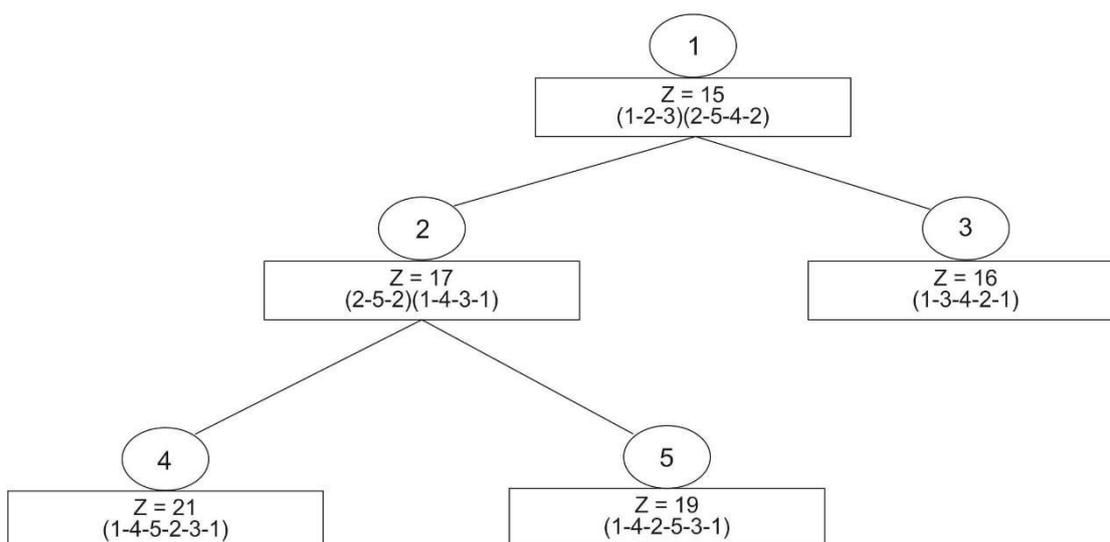
O primeiro algoritmo *Branch and Bound* que se tem registro foi desenvolvido por A. Lang e G. Diog por volta de 1960, com a finalidade de resolver os problemas mistos gerais da programação inteira (TAHA, 2008). Entretanto esse método não se restringe a solução de programação inteira, sendo possível de ser utilizado em vários problemas, como por exemplo, redes de decisão.

Para Taylor (2015), a abordagem *Branch and Bound* baseia-se na ideia de que um conjunto de soluções viáveis possa ser particionado em subconjuntos, que foram impostas por restrições e que vão ocasionando em ramificações a esse problema, o que chamamos de subproblemas. Quando analisadas sistematicamente fornecem que a melhor solução seja encontrada.

Esse método, como pode ser visto em Ribeiro (2018), define limites superiores e inferiores em um esquema de enumeração. Para iniciar o método em um problema com variáveis binárias, uma das variáveis de uma das ramificações deve ser 0 ou 1. Com isso a solução dessas novas ramificações pode ou não gerar novas ramificações. O algoritmo continua até que todos os subproblemas tenham sido resolvidos.

Abaixo, na FIGURA 8, é mostrado uma árvore de solução *Branch and Bound* para um problema qualquer com 5 cidades.

FIGURA 8 - EXEMPLO DE ÁRVORE DE SOLUÇÃO *BRANCH AND BOUND*.



FONTE: ADAPTADO DE TAHA (2008).

Na FIGURA 8 vemos um problema inicial com 5 cidades cujo objetivo é percorrer todas as cidades em um único roteiro. Para o primeiro estágio, representado pelo ramo 1, tem-se uma distância total $Z = 15$ que está dividido em dois roteiros propostos. Aplicando o método *B&B*, o problema é particionado em outros dois cenários em que gera uma solução de $Z = 17$ com dois roteiros para o ramo 2, e uma solução de $Z = 16$ que fornece um único roteiro para o ramo 3. Entretanto, a solução proposta no ramo 3 não passa por uma das cidades exigidas.

Aplicando novamente o *B&B* ao ramo 2 gerou-se mais duas possíveis soluções, cada uma com um único roteiro, onde o ramo 4 tem $Z = 21$ e a ramificação 5 tem $Z = 19$.

Logo o ramo 5 é a solução ótima desse problema, porque dentre as soluções, foi a única proposta que passa por todas as cidades em um único roteiro, e ainda gera a menor distância.

Os trabalhos de Fernando (2016), Araújo (2017) e Melo (2017) apresentam maiores detalhes sobre uma abordagem dos métodos exatos aplicados a diferentes problemas.

2.3.2 Métodos heurísticos

Como mostrado em Arenales (2011), o desenvolvimento dos métodos heurísticos para a otimização combinatória iniciou no fim da década de 1950 e, para aquele momento, ele era utilizado como uma alternativa para resolver os problemas de otimização que até então eram intratáveis para os algoritmos exatos, dado a complexidade do tempo de resposta não ser linear.

O termo heurística vem do grego *heuriskien*, que significa encontrar ou descobrir. A heurística está ligada ao raciocínio indutivo que parte de uma evidência empírica para formular uma solução.

Em relação ao método de solução exato, Taylor (2015) mostra que as vantagens dos métodos heurísticos se referem a uma maior flexibilidade no tratamento das características de um problema, além disso, os métodos heurísticos podem oferecer mais de uma solução, o que na prática permite um aumento das possibilidades de decisões a serem feitas.

Entretanto, uma desvantagem de se utilizar esse tipo de método de resolução é que não se pode garantir que seja encontrada uma solução ótima para o problema,

isso porque de modo geral, não se conhece a qualidade de uma solução fornecida, ou seja, a quão próxima a solução advinda desses métodos está da solução ótima.

Os métodos heurísticos que serão mostrados a seguir, foram classificados por Cunha (2002), como sendo métodos heurísticos de construção de roteiros, isso porque cada nó, que aqui consideramos como sendo cidades, vai sendo inserido um a um no roteiro de maneira sequencial seguindo alguma regra de construção. O que nos permite dizer que esses roteiros gerados por esses métodos foram construídos de forma iterativa, e sem que haja modificações posteriores das sequências parciais das cidades definidas ao longo da execução da heurística.

Nos tópicos a seguir, serão abordados os métodos heurísticos utilizados nesse trabalho para a resolução do Problema do Caixeiro Viajante (PCV).

2.3.2.1 Nearest Neighbor Heuristic

A *Nearest Neighbor Heuristic* ou heurística do vizinho mais próximo, como o próprio nome da heurística sugere, consistem em inserir o vizinho mais próximos ao nó atual sequencialmente. Com isso, espera-se uma boa solução do Problema do Caixeiro Viajante a ser encontrada partindo-se de qualquer ponto (nó) inicial, e depois conectando-se com o próximo nó. Então, a cidade que acabou de ser adicionada ao roteiro é conectada com a cidade seguinte mais próxima dela, onde os empates são resolvidos de maneira arbitrária. O processo continua até ser formado um roteiro completo.

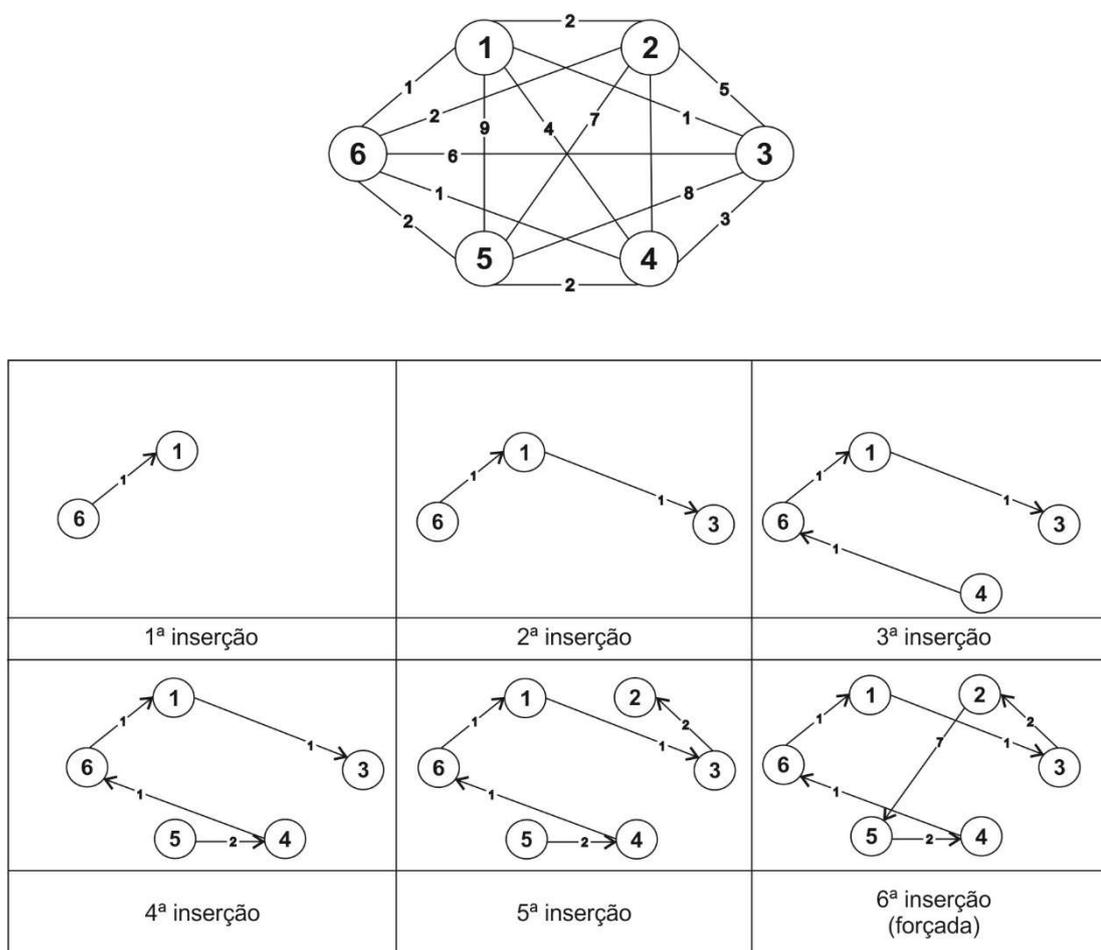
Na FIGURA 9, apresenta-se o fluxograma de funcionamento que exemplifica a heurística de *Nearest Neighbor*.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO NEAREST NEIGHBOR.



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 10 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA DO NEAREST NEIGHBOR.



FONTE: ADAPTADO DE GOLDBARG et al. (2005).

Na FIGURA 10, temos um exemplo de aplicação da heurística do *Nearest Neighbor*, onde vemos que o algoritmo inicia ligando o nó 6 ao nó 1, em seguida, na 2ª inserção, coloca o nó 3 no circuito e assim sucessivamente até concluir todos os nós.

A heurística do vizinho mais próximo parte de um nó inicial, e a cada passo insere o nó mais próximo na rota. A estratégia aqui é caracterizada pelo fato de, a cada passo, o algoritmo toma a decisão de inserir no roteiro a rota de menor distância.

2.3.2.2 *Farthest Insertion Heuristic*

A heurística *Farthest Insertion Heuristic* ou heurística de inserção do mais distante contrapõe-se a do vizinho mais próximo por inserir os nós do final da solução, o que não gera cruzamentos de caminhos.

Ao inserir inicialmente as cidades mais distantes, é estabelecido o contorno geral da rota, que posteriormente é aprimorado adicionando-se cidades próximas o suficiente, sendo que, sua inserção não resulta em um maior distância total da rota (TAHA, 2008).

A FIGURA 11 apresenta o fluxograma de funcionamento que exemplifica a heurística de *Farthest Insertion*.

FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO *FARTHEST-INSERTION*.



FONTE: Autor (2019).

O algoritmo é iniciado com a definição de uma cidade inicial i qualquer como ponto inicial. O passo seguinte consiste em escolher a cidade j mais distante do ponto inicial i . Posteriormente, a cidade j é definida como cidade atual e a cidade i como ponto final e o algoritmo volta ao passo 2 até formar o roteiro completo.

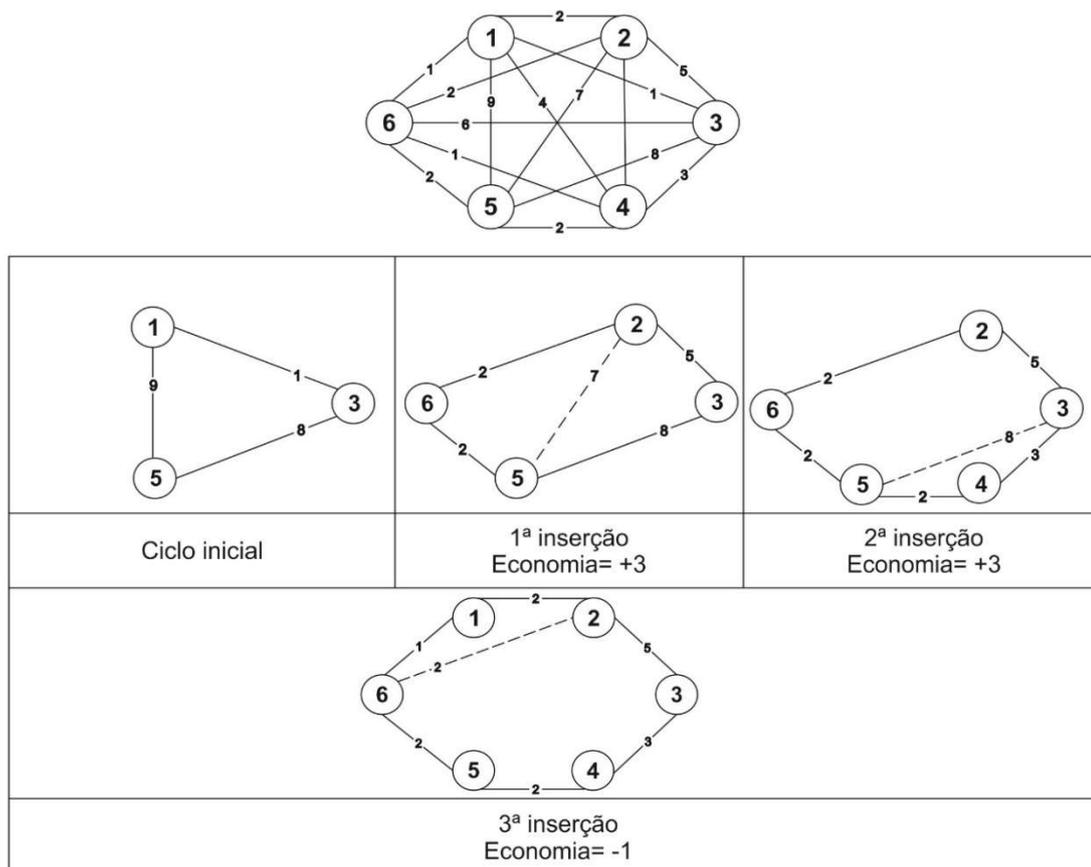
2.3.2.3 *Cheapest Insertion Heuristic*

A heurística *Cheapest Insertion Heuristic* ou heurística de inserção do mais barato é um método de construção mais elaborado do que a heurística de *Nearest Neighbor* e *Farthest Insertion*.

Esse método parte de uma sub-rota inicial e que normalmente contém 3 nós (cidades), e a cada passo adiciona a cidade k que ainda não foi visitada entre as ligações disponíveis (i, j) de cada cidade já visitada. Onde a premissa é que o custo de inserção $(C_{ij} < C_{ij} = C_{jk})$ seja o mais barato possível (GOLDBARG e LUNA, 2005).

A FIGURA 12 apresenta um grafo que contém os custos de deslocamento entre cada cidade e que serve como exemplo de aplicação dessa heurística para um problema que contém 6 cidades.

FIGURA 12 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA HEURÍSTICA DO CHEAPEST INSERTION.



FONTE: ADAPTADO DE GOLDBARG et al. (2005).

Note que inicialmente parte-se de uma rota qualquer e em seguida, a partir da primeira iteração, insere-se a cidade mais barata até que se tenha completado todo o roteiro proposto.

2.3.2.4 K-opt

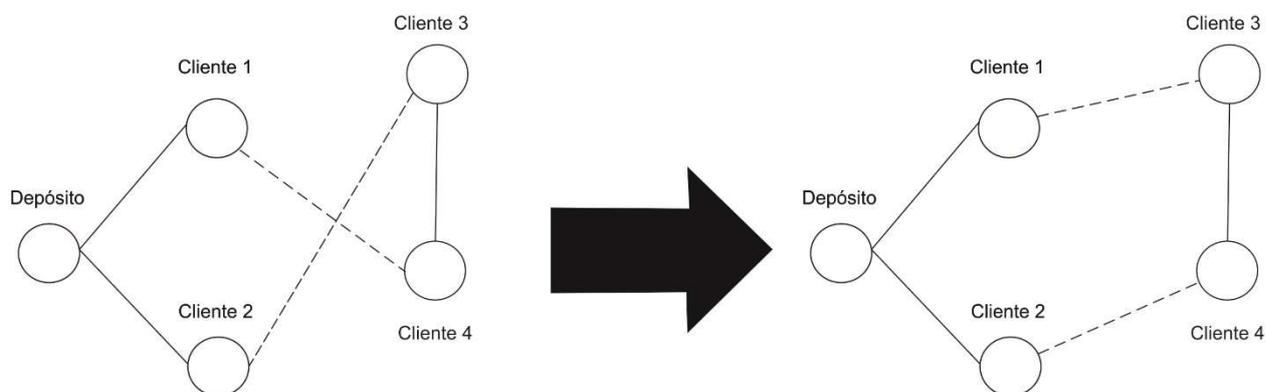
Considerada como sendo uma heurística de busca local, essa classe heurística busca melhorar uma solução do PCV e para isso parte de uma solução inicial, que pode ser obtida por algum método construtivo ou até mesmo gerado

aleatoriamente e tem como estratégia a realização de modificações em uma solução inicial viável visando eliminar possíveis cruzamentos de roteiros propostos.

O método *K-opt* foi proposto por Lin e Kernighan (1973), nos quais k arcos são removidos de um roteiro e substituídos por outros k arcos, com a finalidade de diminuir a distância total percorrida removendo os cruzamentos, como pode ser visto na FIGURA 13.

Conforme Laporte (2000), quanto maior o número de k , melhor a precisão do método, entretanto também aumenta o esforço computacional para se obter uma solução.

FIGURA 13 - SOLUÇÃO AJUSTADA PELO K-OPT.



FONTE: ADAPTADO DE DIAS (2018).

No QUADRO 2, mostra-se alguns trabalhos encontrados na literatura e que utilizam os métodos heurísticos mencionados para a resolução de diferentes problemáticas.

QUADRO 2 – TRABALHOS QUE UTILIZAM MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO.

AUTOR	TEMA	ANO
BENEVIDES,P.F	Aplicação de heurísticas e metaheurísticas para o problema do Caixeiro Viajante em um problema real de roteirização de veículos.	2011
KRETZSCHMAR, L. A	Análise de resultados na construção de rota para o Problema do Caixeiro Viajante.	2013
SILVA, G. A. N.	Algoritmos heurísticos construtivos aplicados ao Problema do Caixeiro Viajante para a definição de rotas otimizadas.	2013

FONTE: Autor (2019).

2.4 LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO JULIA

A linguagem de programação Julia, para Bezanson et al. (2015), é uma programação compilada *open source* de alto nível, que foi projetada para a computação científica e numérica de alto desempenho.

Essa é uma linguagem nova, que foi criada em 2009 no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Para Castellucci (2017), vemos que a ambição dos criadores é que o Julia tenha a produtividade do *Python* e a eficiência do C.

O site oficial do Julia, lista como principais recursos da linguagem a sintaxe intuitiva e semelhante a do *Matlab*®, e o bom desempenho que a coloca próximo a linguagens compiladas estaticamente como a linguagem C.

O processo de compilação na linguagem Julia é descrito da seguinte maneira:

Na primeira vez em que é executada uma função na linguagem Julia, ela é analisada e os tipos são inseridos. Em seguida, o código LLVM é gerado pelo compilador JIT, que é otimizado e compilado pelo código nativo. Na segunda vez que é executada a função Julia, o código nativo, já gerado é chamado. Esta é a razão pelo qual, na segunda vez em que é chamada uma função com argumentos de um tipo específico, o tempo de execução é bem menor que na primeira vez (BALBAERT, 2015, p. 35).

Dentro da linguagem de programação Julia, existem diversos pacotes já implementados, dentre eles o *travelsalesmanheuristics*, que resolve distâncias do Problema do Caixeiro Viajante determinando o menor caminho que liga os diversos destinos.

3 PROCEDIMENTO METODOLOGICOS

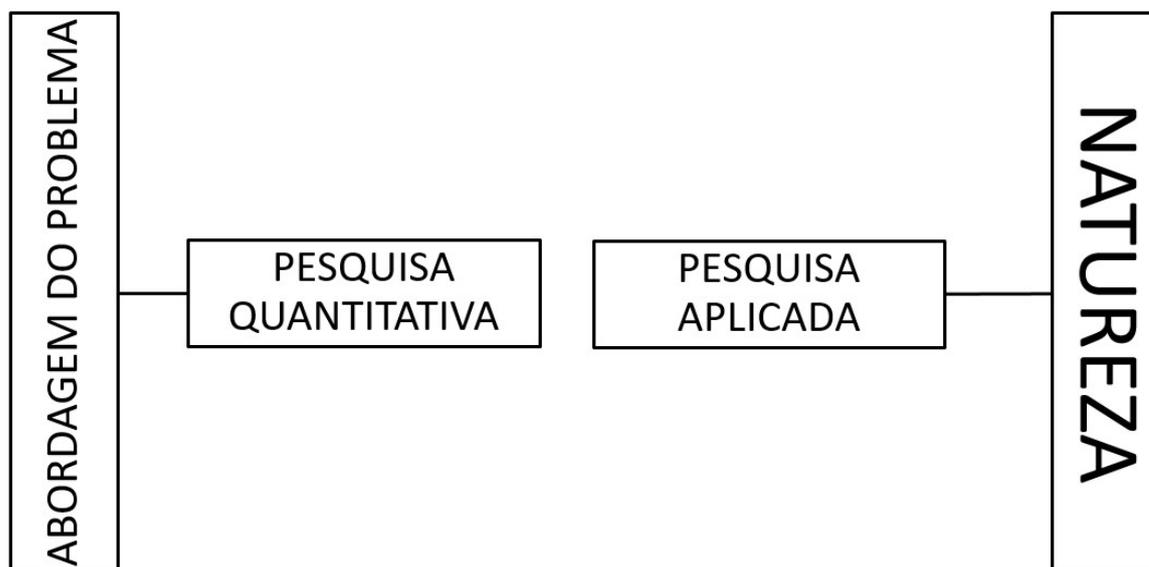
Esse capítulo descreve as classificações desse trabalho, bem como as etapas que serão executadas para a obtenção dos objetivos descritos no item 1.2.

3.1 ENQUADRAMENTO DA PESQUISA

Este trabalho de pesquisa sobre otimização de rotas de transporte de produtos para uma média empresa tem as seguintes classificações.

Para Silva e Menezes (2005), do ponto de vista da natureza, o presente trabalho é classificado como sendo uma pesquisa aplicada, porque dela são gerados conhecimentos para a resolução de problemas práticos. Quanto a forma da abordagem do problema, este se caracteriza como sendo uma pesquisa quantitativa, porque tudo o que é estudado pode ser quantificado, ou seja, consegue-se traduzir em números as informações para além de classificá-las, analisá-las.

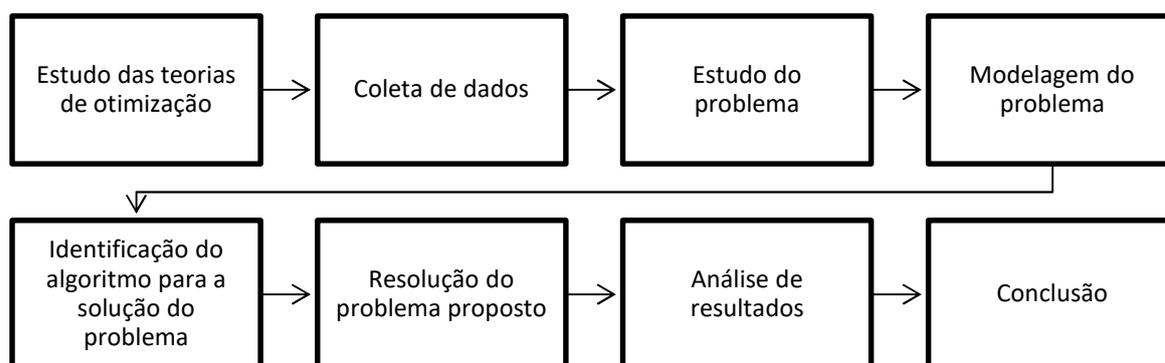
FIGURA 14 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.



FONTE: Autor (2019).

Segundo as classificações desta pesquisa, na FIGURA 15 são apresentadas as etapas que auxiliam no cumprimento do objetivo geral.

FIGURA 15 - ETAPAS DA PESQUISA.



FONTE: Autor (2019).

3.2 ABORDAGEM MÉTODOLÓGICA

A metodologia usada para alcançar os objetivos deste trabalho envolvem a coleta de dados na empresa.

Inicialmente, obteve-se as informações das quilometragens totais de rodagens por roteiro realizado pela empresa, e quais eram as cidades que compunham cada roteiro a ser realizado.

Com o propósito de se aplicar os métodos exatos e heurísticos essa metodologia envolve, genericamente, quatro aspectos.

- Definição do problema e formulação da modelagem matemática;
- Coleta de dados e construção da matriz distâncias;
- Interpretação dos dados obtidos da utilização do *JuliaBox* e de planilhas eletrônicas;
- Definições das hipóteses do trabalho.

3.2.1 Definição do problema e formulação da modelagem matemática.

Para a formulação da modelagem matemática deste problema, as variáveis de decisão que serão consideradas para essa análise é a distância euclidiana entre cada cidade que devem ser visitadas.

3.2.2 Coleta de dados e construção da matriz distâncias.

A construção da matriz distâncias é a fase em que há a transformação de todas as informações fornecidas pela empresa, como cidades a serem visitadas, em uma base numérica com os dados de latitude e longitude das cidades que compõem os roteiros de entregas.

3.2.3 Interpretação dos dados obtidos da utilização do *JuliaBox* e de planilhas eletrônicas.

A obtenção dos dados para a interpretação, para os métodos heurísticos, se deu por meio do *JuliaBox*, plataforma online e gratuita que oferece resolução para problemas computacionais de alto nível. Outra forma de obtenção dos dados foi via planilhas eletrônicas para a simulação dos métodos exatos.

Dessa interpretação será definido o melhor roteiro, dentro de todas as possibilidades de otimização, e compará-lo com o cenário das rotas realizadas pela empresa.

3.2.4 Hipóteses do trabalho.

Para a proposta de otimização de roteiros de uma empresa do setor de embalagens de madeira, esse trabalho não leva em consideração custos extras relacionados ao transporte, como pedágio ou custos adicionais relacionados ao tipo ou idade do veículo, por exemplo. Esse trabalho leva em consideração as quilometragens diretamente relacionados à distância percorrida.

Outra hipótese é que a empresa possui capacidade limitada de transporte e a demanda de cada cliente é diferente. Esses aspectos não foram abordados nesse trabalho.

3.3 DESCRIÇÃO DO CASO

A empresa objeto deste trabalho é especializada no desenvolvimento e fabricação de embalagens de madeira e pallets para exportação. Com mais de 20

anos no mercado, a empresa conta com um parque industrial de 12.000 m² na cidade de Curitiba – PR.

Diante de um cenário de aumento das exportações do Brasil, essa empresa teve aumento na demanda de seus produtos nos últimos anos, tanto embalagens de madeira, quanto pallets, e com isso pretende se adaptar a esse novo cenário, onde cada vez mais seus pedidos estão sujeitos a entregas em longas distâncias.

Com isso, por meio desse estudo preliminar, pretende-se mostrar que a utilização de softwares para a otimização de rotas é viável e gera economias no transporte.

4 O CENÁRIO ATUAL DA EMPRESA

Esse capítulo mostra o roteiro atual de distribuição da empresa, bem como as quilometragens percorrida para a realização destes trajetos.

4.1 ROTAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADAS PELA EMPRESA

As rotas atualmente utilizadas pela empresa estão distribuídas em cinco roteiros de entregas, como pode ser visto no QUADRO 3.

QUADRO 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS ROTEIROS DA EMPRESA.

ITEM	DESCRIÇÃO
Roteiro 1	PR – Norte
Roteiro 2	SP (Capital)
Roteiro 3	SC (Florianópolis)
Roteiro 4	SC (Interior)
Roteiro 5	PR Paulista

FONTE: Autor (2019).

O primeiro roteiro, mostrado no QUADRO 4, é chamado pela empresa como sendo a rota PR – Norte, e que faz o trajeto partindo de Curitiba – PR em direção ao norte do Paraná, depois passa pelo norte de Santa Catarina e retorna a Curitiba.

QUADRO 4 - ROTEIRO 1 USADO PELA EMPRESA.

DESTINOS - PR (Norte)			Data:
			Revisão
			0/0
Cidade	Endereço		Carga
Curitiba	-	-	Entrega
Campo Largo	-	-	Entrega
Ponta Grossa	-	-	Entrega
Ventania	-	-	Entrega
Ortigueira	-	-	Entrega
Guarapuava	-	-	Entrega
Cascavel	-	-	Entrega
Toledo	-	-	Entrega
Pato Branco	-	-	Entrega
Maringá	-	-	Entrega
Guaira	-	-	Entrega
Busque - SC	-	-	Entrega
Itapema	-	-	Entrega

FONTE: Autor (2019).

O segundo roteiro, mostrado no QUADRO 5, chama-se SP (Capital) onde se inicia em Curitiba – PR, passa pela capital paulista e segue para o litoral do estado de São Paulo e retorna a Curitiba - PR.

QUADRO 5 - ROTEIRO 2 USADO PELA EMPRESA.

DESTINOS - SP (Capital)			Data:
			Revisão
			0/0
Cidade	Endereço		Carga
Curitiba	-	-	Entrega
Sorocaba	-	-	Entrega
São Paulo	-	-	Entrega
Campinas	-	-	Entrega
São José dos Campos	-	-	Entrega
Santos	-	-	Entrega

FONTE: Autor (2019).

O terceiro roteiro, mostrado no QUADRO 6, chama-se SC - Florianópolis. Essa rota parte de Curitiba – PR, passa pelo litoral catarinense e vai até Caxias do Sul, no Rio Grande do Sul e retorna a Curitiba - PR.

QUADRO 6 - ROTEIRO 3 USADO PELA EMPRESA.

DESTINOS - SC (Florianopolis)			Data:
			Revisão
			0/0
Cidade	Endereço		Carga
Curitiba	-	-	Entrega
Joinville	-	-	Entrega
Balneário Cambui	-	-	Entrega
Florianopolis	-	-	Entrega
Lages	-	-	Entrega
Caxias do Sul - RS	-	-	Entrega

FONTE: Autor (2019).

O quarto roteiro, chamado de SC interior e que pode ser visto no QUADRO 7, parte de Curitiba – PR e entra no interior do estado de Santa Catarina até a cidade de Xanxerê e retorna para a Curitiba - PR.

QUADRO 7 - ROTEIRO 4 USADO PELA EMPRESA.

DESTINOS - SC (Interior)			Data:
			Revisão
Cidade	Endereço		Carga
Curitiba	-	-	Entrega
Mafra	-	-	Entrega
Porto União	-	-	Entrega
Caçador	-	-	Entrega
Xanxerê	-	-	Entrega

FONTE: Autor (2019).

E, por fim o roteiro cinco, mostrado no QUADRO 8, chamado de PR Paulista, parte de Curitiba – PR e faz um trajeto que passa na região dos campos gerais no Paraná e parte para Votuporanga, na região noroeste do estado de São Paulo e retorna a Curitiba - PR.

QUADRO 8 - ROTEIRO 5 USADO PELA EMPRESA.

DESTINOS - PR (Paulista)			Data:
			Revisão
Cidade	Endereço		Carga
Curitiba	-	-	Entrega
Castro	-	-	Entrega
Ourinhos	-	-	Entrega
Marília	-	-	Entrega
São José do Rio Preto	-	-	Entrega
Votuporanga	-	-	Entrega

FONTE: Autor (2019).

Todos os roteiros de entregas apresentados, e que são atualmente utilizados pela empresa, foram feitos sem o uso de nenhum sistema de apoio que os auxilie na escolha das rotas de distribuição. Essa decisão de qual o caminho a ser seguido, normalmente é feita de maneira empírica, apenas utilizando-se de históricos dos roteiros usados no passado.

Na TABELA 8, está a quilometragem total de rodagem fornecida pela empresa dos cinco roteiros que são utilizados atualmente.

TABELA 8 - QUILOMETRAGEM ATUAL PERCORRIDA (POR ROTEIRO).

	ROTEIRO 1	ROTEIRO 2	ROTEIRO 3	ROTEIRO 4	ROTEIRO 5
Km rodados	2897 Km	1292 Km	1338 Km	940 Km	1106 Km

FONTE: Autor (2019).

Para validar os dados de quilometragem fornecidos pela empresa para realização dos cinco roteiros, inicialmente foi testado na plataforma *Google Maps* o mesmo sequenciamento de cidades atualmente usados pela empresa, e foi constatado que na realidade, as quilometragens totais percorrida para a realização dos cinco roteiros, divergem da informação fornecida pelo motorista da empresa. As quilometragens, segundo o *Google Maps*, por roteiro, podem ser vistas na TABELA 9.

TABELA 9 - QUILOMETRAGEM SEGUNDO O *GOOGLE MAPS* (POR ROTEIRO).

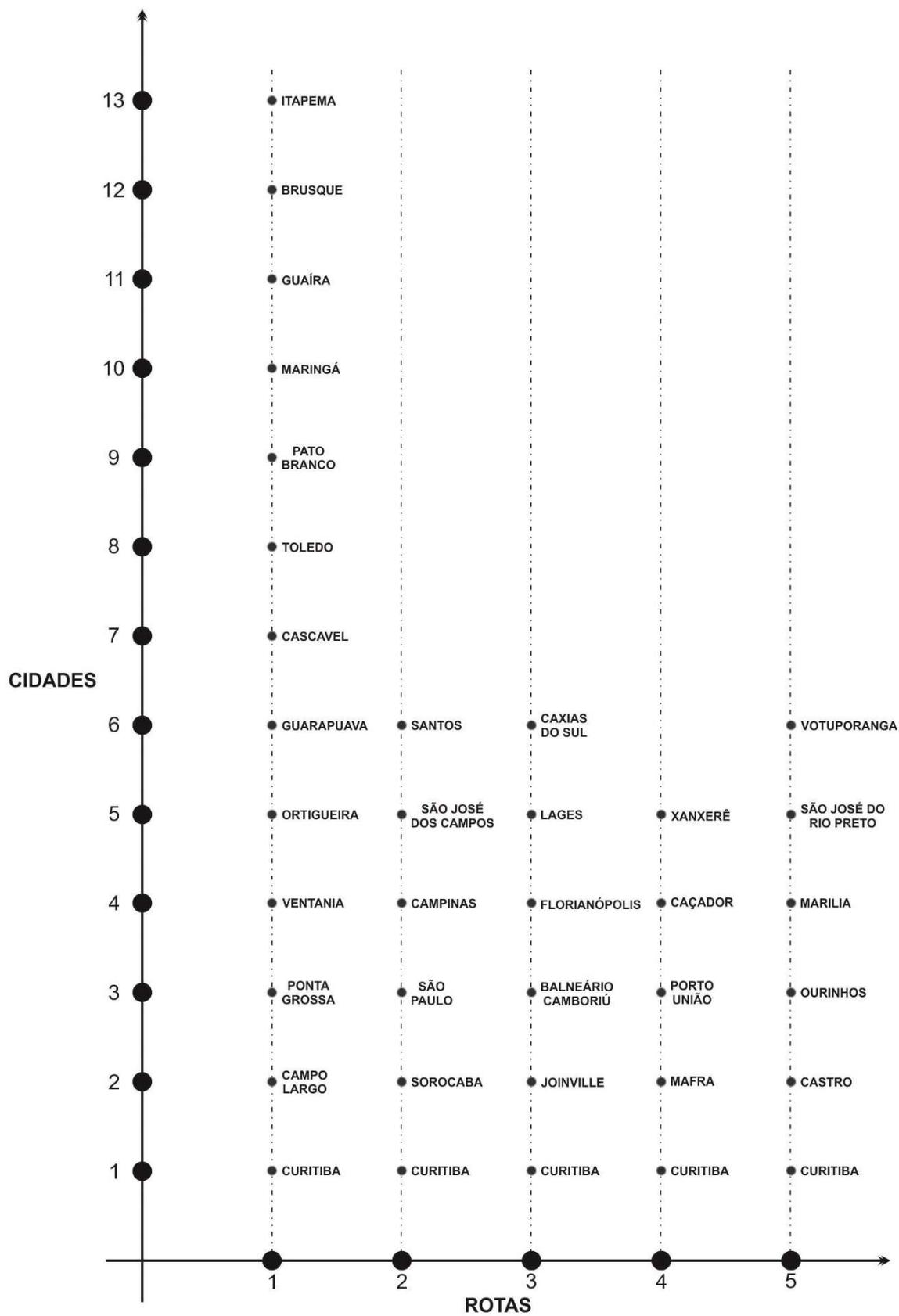
	ROTEIRO 1	ROTEIRO 2	ROTEIRO 3	ROTEIRO 4	ROTEIRO 5
Km rodados	3276 Km	1292 Km	1338 Km	940 Km	1069 Km

FONTE: Autor (2019).

É possível notar na TABELA 9 as divergências dos valores de quilometragem de rodagem dos roteiros 1 e 5, onde inúmeros fatores podem ter contribuído para que essa divergência tenha ocorrido, por exemplo, o ponto ou região da cidade onde são realizadas as coletas. Portanto, para a realização desse trabalho, o fator de comparação do cenário atual serão os dados de quilometragem total de rodagem, por roteiro, obtidos via plataforma *Google Maps*.

Para fins de resolução do problema de rotas da empresa de embalagens de madeira, por meio do PCV, cada cidade recebeu uma numeração sequencial de acordo com os pontos passados por cada roteiro disponibilizado pela empresa, e pode ser visto na FIGURA 16, que mostra um diagrama onde relaciona-se os cinco roteiros e os números de cada cidade representada na solução.

FIGURA 16 - CIDADES POR ROTЕIRO.



FONTE: Autor (2019).

5 RESULTADOS OBTIDOS E SUAS ANÁLISES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para o problema de rotas da empresa, e que contou com a utilização de ferramentas e métodos da Pesquisa Operacional para a otimização das rotas de transporte.

Os testes para os métodos heurísticos foram feitos utilizando o solver *JuliaBox*, plataforma online que usa a linguagem de programação Julia. Os testes via métodos heurísticos foram realizados na versão 10 do sistema operacional *Windows* em uma plataforma Intel Core i5, com 8 GB de memória RAM.

Utilizando a implementação já existente da heurística *Cheapest Insertion* do Julia, os resultados obtidos podem ser vistos na TABELA 10.

TABELA 10 - QUILOMETRAGEM TOTAL DA ROTA OBTIDA PELA HEURÍSTICA *CHEAPEST INSERTION*.

	ROTEIRO 1	ROTEIRO 2	ROTEIRO 3	ROTEIRO 4	ROTEIRO 5
Km rodados	1687,07 Km	965,31 Km	1021,66 Km	730,47 Km	1189,15 Km

FONTE: Autor (2019).

O mesmo solver dá a seguinte distância total utilizando a heurística *Nearest Neighbor*, e que pode ser visto na TABELA 11.

TABELA 11 - QUILOMETRAGEM TOTAL DA ROTA OBTIDA PELA HEURÍSTICA *NEAREST NEIGHBOR*.

	ROTEIRO 1	ROTEIRO 2	ROTEIRO 3	ROTEIRO 4	ROTEIRO 5
Km rodados	1633,82 Km	965,31 Km	1021,66 Km	730,47 Km	1178,97 Km

FONTE: Autor (2019).

O novo roteiro proposto utilizando a heurística de *Farthest Insertion* mostra a seguinte quilometragem de rodagem.

TABELA 12 - QUILOMETRAGEM TOTAL DA ROTA OBTIDA PELA HEURÍSTICA *FARTHEST INSERTION*.

	ROTEIRO 1	ROTEIRO 2	ROTEIRO 3	ROTEIRO 4	ROTEIRO 5
Km rodados	1633,82 Km	965,31 Km	1021,66 Km	730,47 Km	1178,97 Km

FONTE: Autor (2019).

Note que as soluções propostas utilizando as heurísticas *Nearest Insertion* e *Farthest Insertion* possuem a mesma quilometragem total de rodagem por roteiro. Entretanto, como pode ser visto na TABELA 13, TABELA 14, TABELA 15, TABELA 16 e TABELA 17, essas duas heurísticas apresentaram, em alguns casos, sequências iguais de cidades a serem visitadas ou mesmo sequências opostas de cidades para serem visitadas.

TABELA 13 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTERO 1 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.

<i>CHEAPEST INSERTION</i>														
1	13	9	8	5	12	4	10	6	11	3	2	7	1	1687,04 Km
<i>NEAREST NEIGHBOR</i>														
1	3	11	13	9	8	5	12	4	10	6	2	7	1	1633,82 Km
<i>FARTHEST INSERTION</i>														
1	3	11	13	9	8	5	12	4	10	6	2	7	1	1633,82 Km

FONTE: Autor (2019).

TABELA 14 - SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTERO 2 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.

<i>CHEAPEST INSERTION</i>							
1	3	5	4	2	6	1	965,31 Km
<i>NEAREST NEIGHBOR</i>							
1	3	5	4	2	6	1	965,31 Km
<i>FARTHEST INSERTION</i>							
1	3	5	4	2	6	1	965,31 Km

FONTE: Autor (2019).

TABELA 15 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTERO 3 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.

<i>CHEAPEST INSERTION</i>							
1	6	3	4	2	5	1	1021,66 Km
<i>NEAREST NEIGHBOR</i>							
1	6	3	4	2	5	1	1021,66 Km
<i>FARTHEST INSERTION</i>							
1	5	2	4	3	6	1	1021,66 Km

FONTE: Autor (2019).

TABELA 16 – SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 4 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.

CHEAPEST INSERTION						
1	4	5	2	3	1	730,47 Km
NEAREST NEIGHBOR						
1	3	2	5	4	1	730,47 Km
FARTHEST INSERTION						
1	3	2	5	4	1	730,47 Km

FONTE: Autor (2019).

TABELA 17 - SEQUÊNCIA DE CIDADES DO ROTEIRO 5 VIA MÉTODOS HEURISTICOS.

CHEAPEST INSERTION							
1	4	5	6	3	2	1	1189,15 Km
NEAREST NEIGHBOR							
1	2	4	3	6	5	1	1178,97 Km
FARTHEST INSERTION							
1	2	4	3	6	5	1	1178,97 Km

FONTE: Autor (2019).

A nível de comparação, para verificar a qualidade da solução proposta via métodos heurísticos, testamos a resolução do mesmo problema, agora pelo método exato. Utilizando planilhas eletrônicas, aplicamos o método *Branch and Bound*, onde as quilometragens das rotas otimizadas são apresentadas na TABELA 18.

TABELA 18 - QUILOMETRAGEM OTIMIZADA OBTIDA PELO MÉTODO EXATO *BRANCH AND BOUND*.

	ROTEIRO 1	ROTEIRO 2	ROTEIRO 3	ROTEIRO 4	ROTEIRO 5
Km rodados	1132,9 Km	915,67 Km	957,61 Km	715,57 Km	1068,82 Km

FONTE: Autor (2019).

A sequência de cidades a serem visitadas obtida da aplicação do método *Branch and Bound* é apresentado no QUADRO 9.

QUADRO 9 - SEQUÊNCIA DO ROTEIROS OTIMIZADOS VIA *BRANCH AND BOUND*.

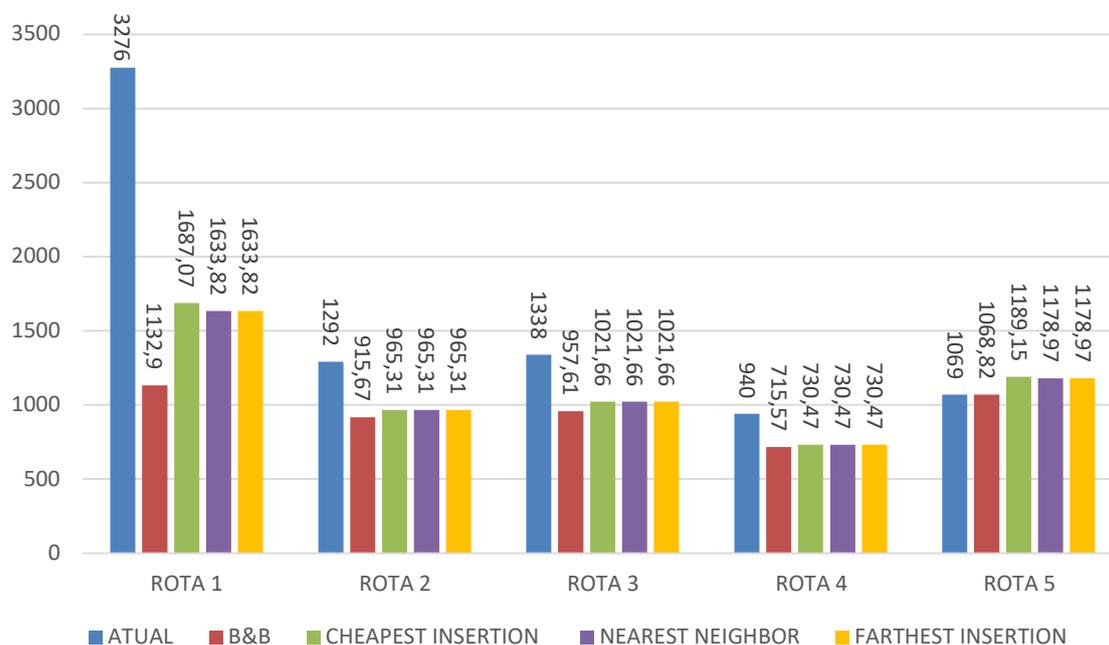
ROTEIRO 1														
1	3	6	9	7	8	11	10	5	4	2	13	12	1	1132,9 Km
ROTEIRO 2														

1	2	4	3	5	6	1	915,67 Km
ROTEIRO 3							
1	2	3	4	6	5	1	957,61 Km
ROTEIRO 4							
1	3	5	4	2	1		715,57 Km
ROTEIRO 5							
1	2	3	4	6	5	1	1068,82 Km

FONTE: Autor (2019).

Na FIGURA 17, é apresentado um gráfico com as quilometragens totais obtidas pelos métodos heurísticos e exato de resolução para cada roteiro, bem como o que é utilizado atualmente pela empresa.

FIGURA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS OTIMIZADAS VERSUS A DISTÂNCIA USADA ATUALMENTE (POR ROTA).



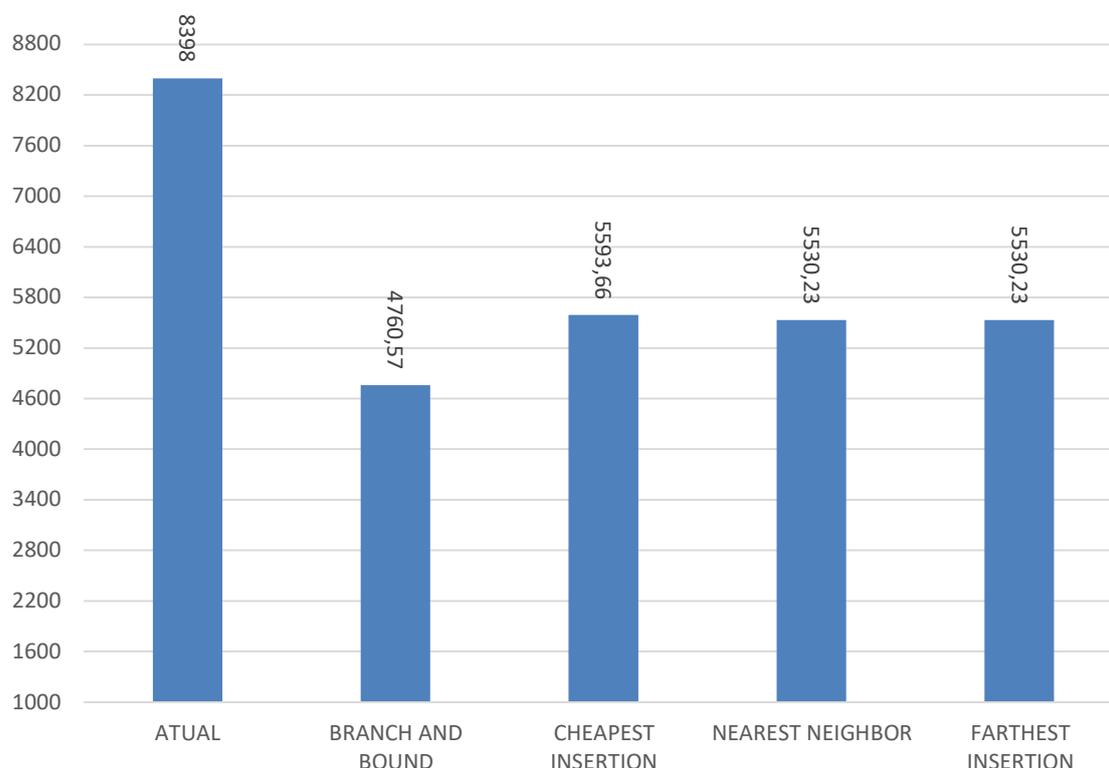
FONTE: Autor (2019).

A FIGURA 17 deixa evidente que, para quatro dos cinco roteiros testados, os métodos de resolução desse problema geraram quilometragens menores quando comparados ao roteiro obtido pelo método empírico, utilizado pela empresa atualmente. No roteiro cinco, a proposta de solução otimizada equivale-se ao usado pela empresa.

Entretanto, para se ter uma análise mais precisa, é necessário ver os cinco roteiros de uma maneira global, onde os cinco roteiros são somados.

A FIGURA 18 mostra um gráfico onde-se tem a comparação da quilometragem global de rodagem, ou seja, somando os cinco roteiros para cada método heurístico e exato utilizado por esse trabalho, e o compara com a quilometragem usada atualmente pela empresa.

FIGURA 18 - QUILOMETRAGEM TOTAL DE RODAGEM (POR MÉTODO DE SOLUÇÃO) VERSUS ATUAL.



FONTE: Autor (2019).

Dos métodos heurísticos testados, a heurística de *Cheapest Insertion*, é a heurística que leva em consideração a inserção mais barata, foi a que gerou maior distância quando comparada com os outros métodos heurísticos de resolução do problema.

Isso se deve ao fato de que a heurística de inserção mais barata leva em conta a menor distância entre a busca local dos pontos a serem percorridos. Entretanto, uma análise global mostra que, quando se designa uma rota partindo do pressuposto de se sair de um ponto inicial e ir inserindo ao roteiro somente os pontos (nó) mais baratos, não é uma boa estratégia se o roteiros contém muitos pontos a serem

visitados, pois o local com o menor custo pode não ser necessariamente o mais próximo do local de origem.

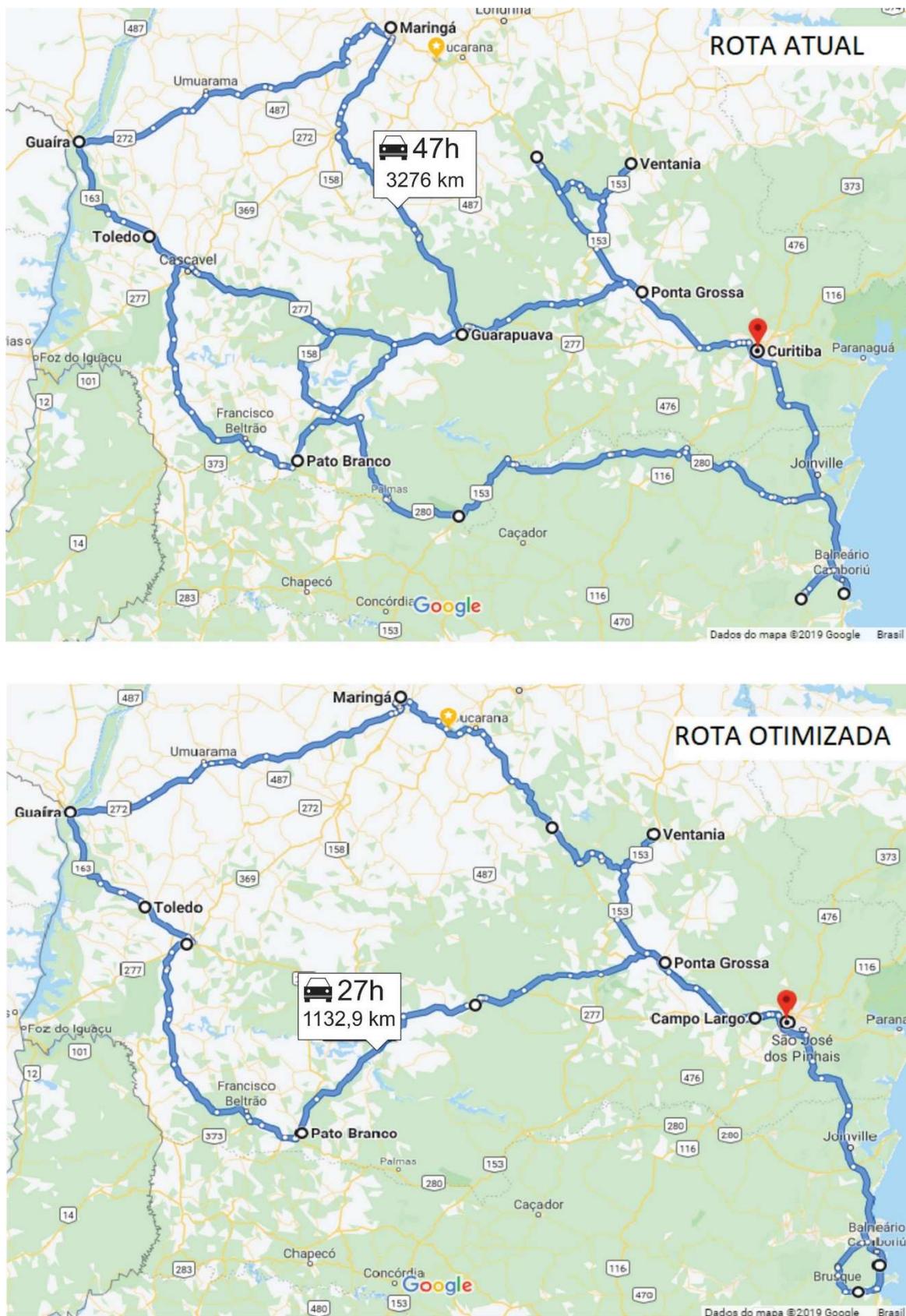
Já as heurísticas *Nearest Neighbor* e *Farthest Insertion* se saíram melhores quando comparadas com a *Cheapest Insertion*, pois resolveram o problema de rotas presando sempre pela melhor combinação que retorne a menor distância percorrida entre todos os pontos a serem visitados.

A solução com menor quilometragem total foi obtida pelo *Branch and Bound*. Quando comparada ao roteiro atual da empresa essa diferença é ainda maior, como pode ser vista ainda na FIGURA 18, que mostra um gráfico que compara as quilometragens totais de rodagem obtidas versus a atual.

Esses números reforçam ainda mais a importância e o impacto que a utilização de métodos de otimização gera de economias para as empresas.

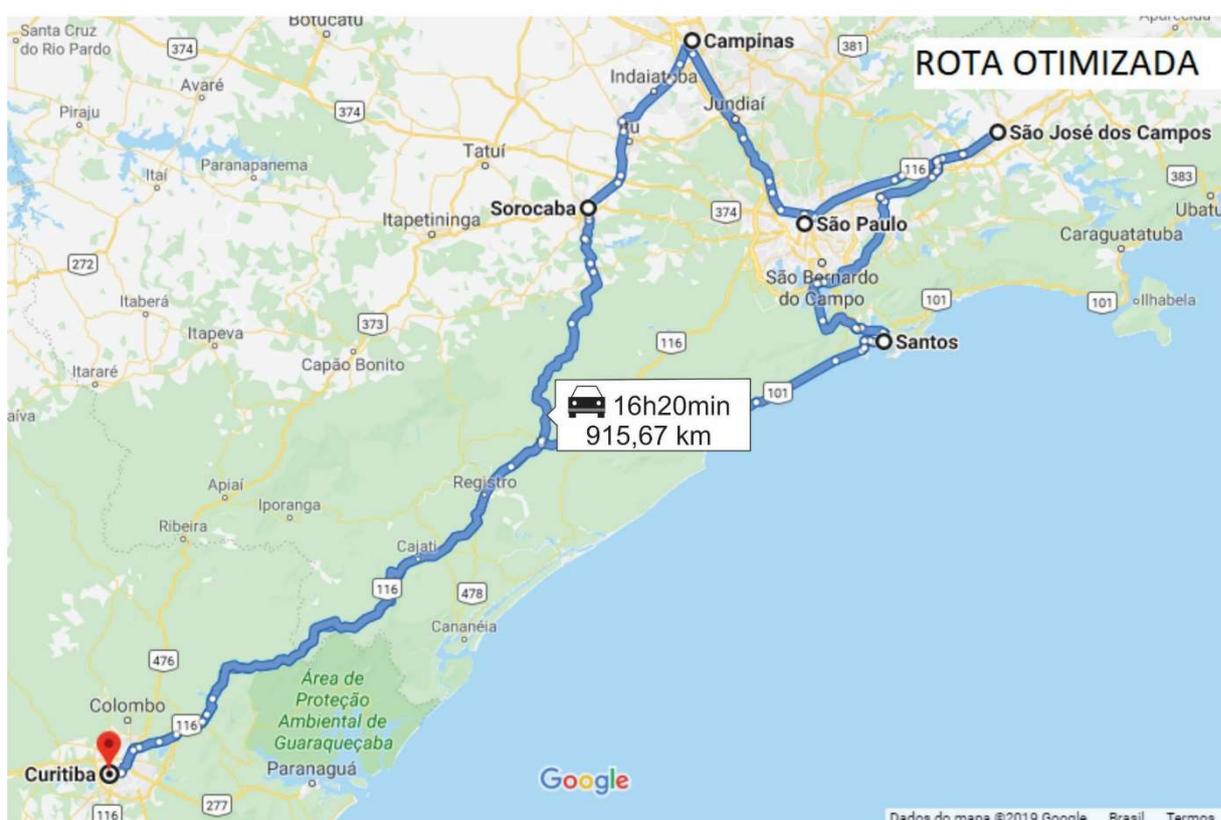
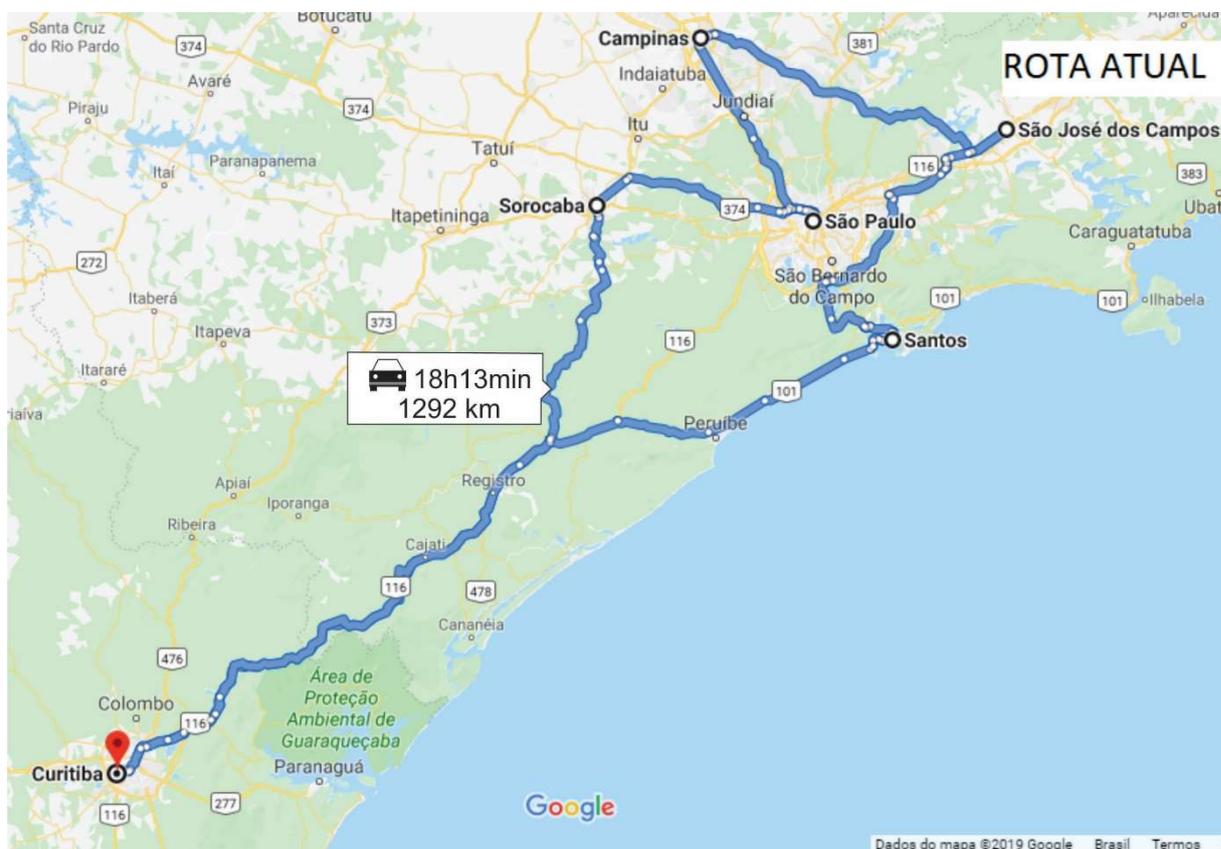
Para mostrar como essas técnicas de otimização podem impactar na rotina estratégica dos transportes dessa empresa, apresenta-se na FIGURA 19, FIGURA 20, FIGURA 21, FIGURA 22 e FIGURA 23 o mapa com os novos roteiros propostos.

FIGURA 19 - COMPARAÇÃO DO ROTЕIRO 1 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA.



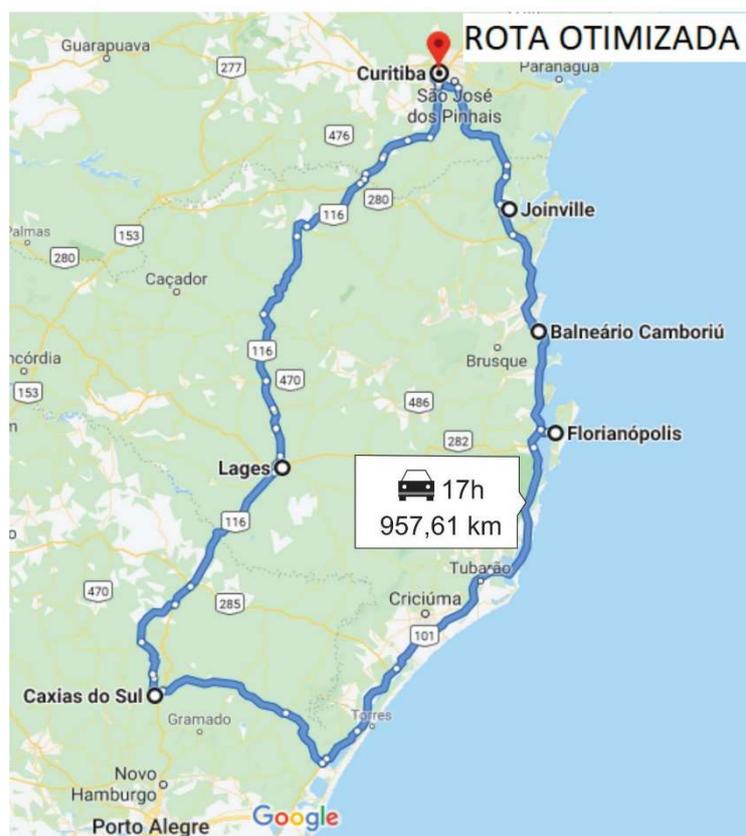
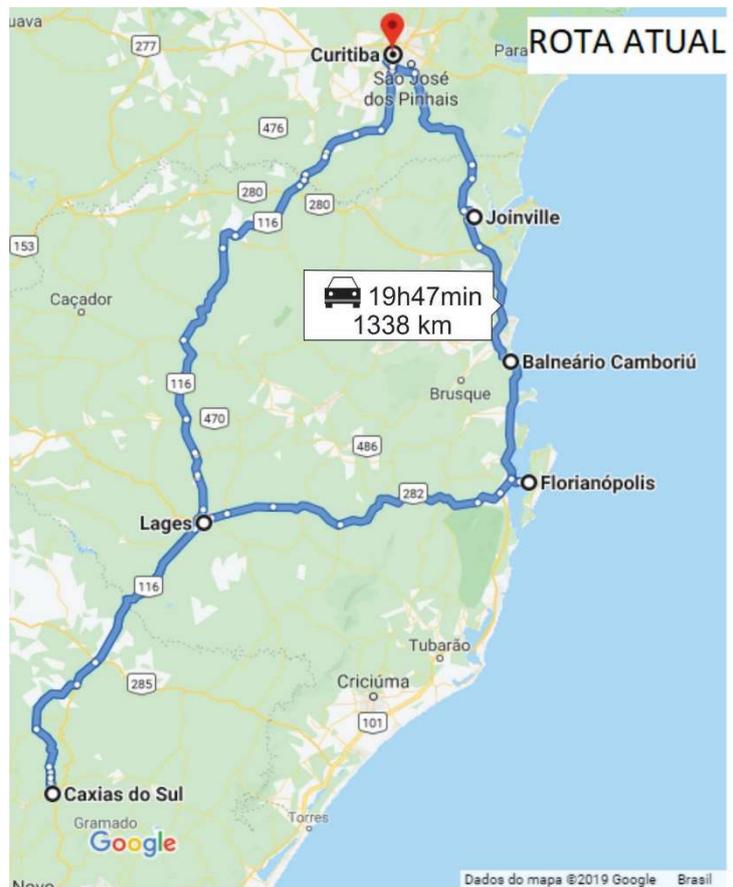
FONTE: Google Maps (2019).

FIGURA 20 - COMPARAÇÃO DO ROTЕIRO 2 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA.



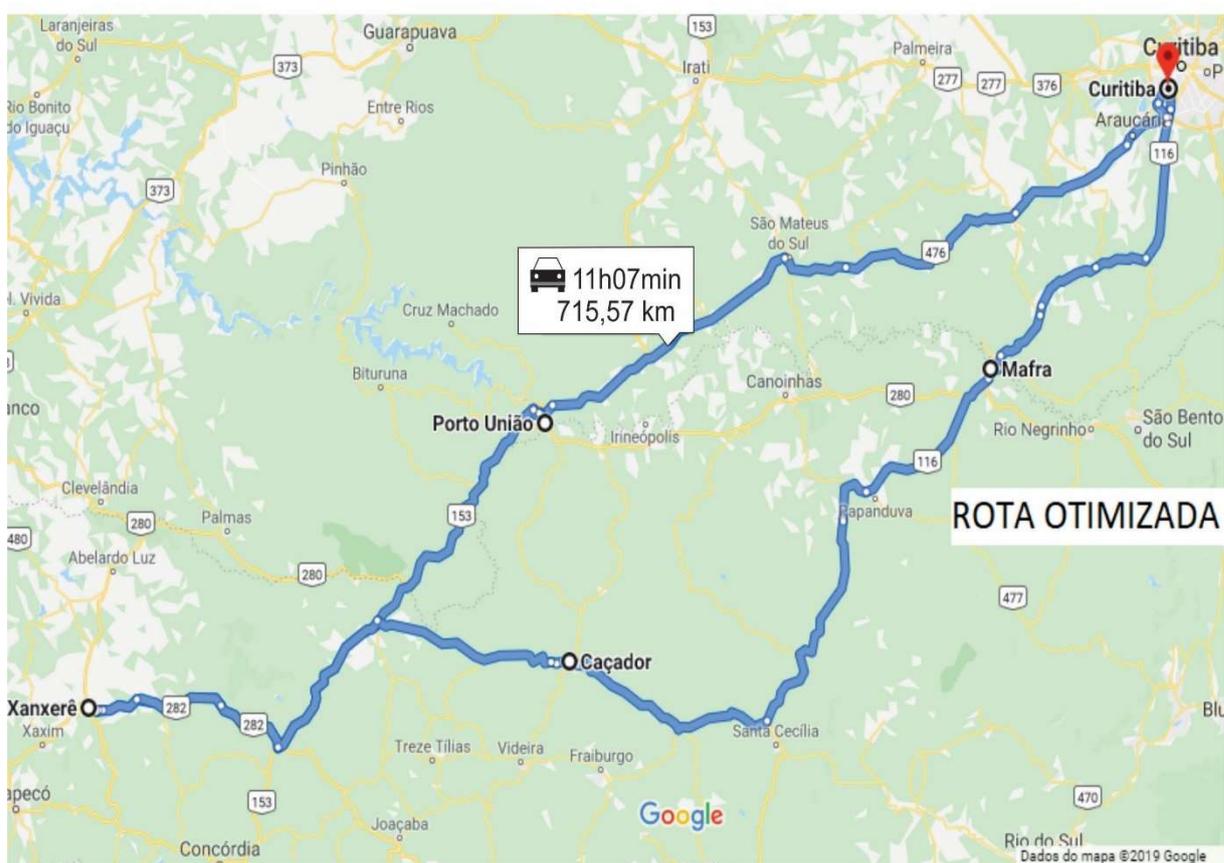
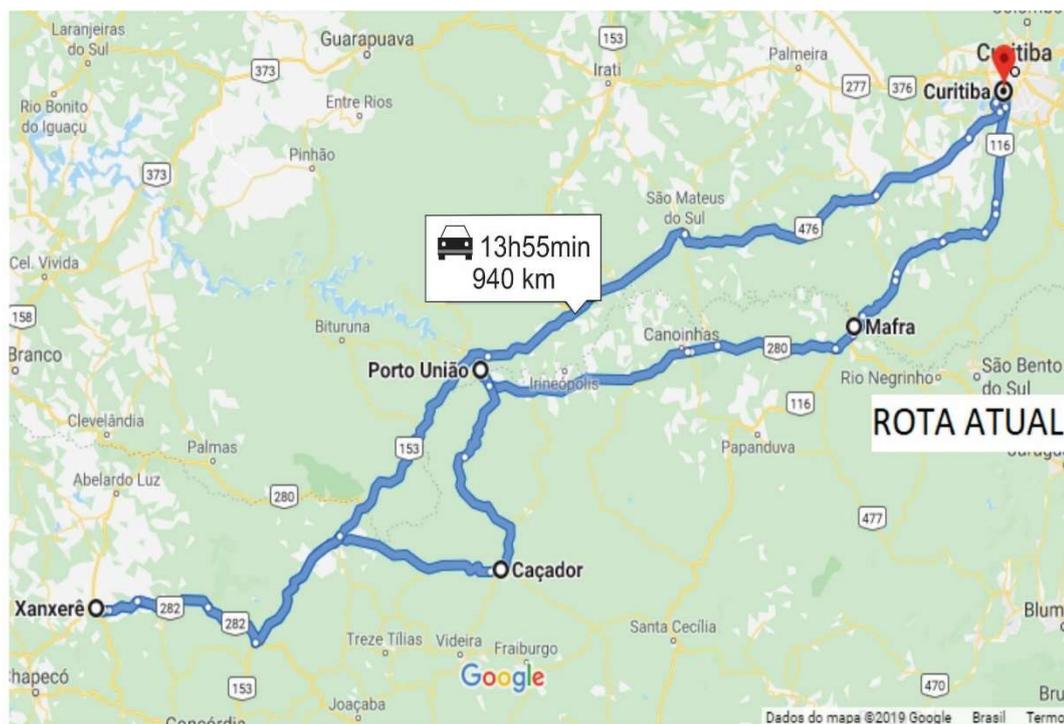
FONTE: Google Maps (2019).

FIGURA 21- COMPARAÇÃO DO ROTЕIRO 3 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA.



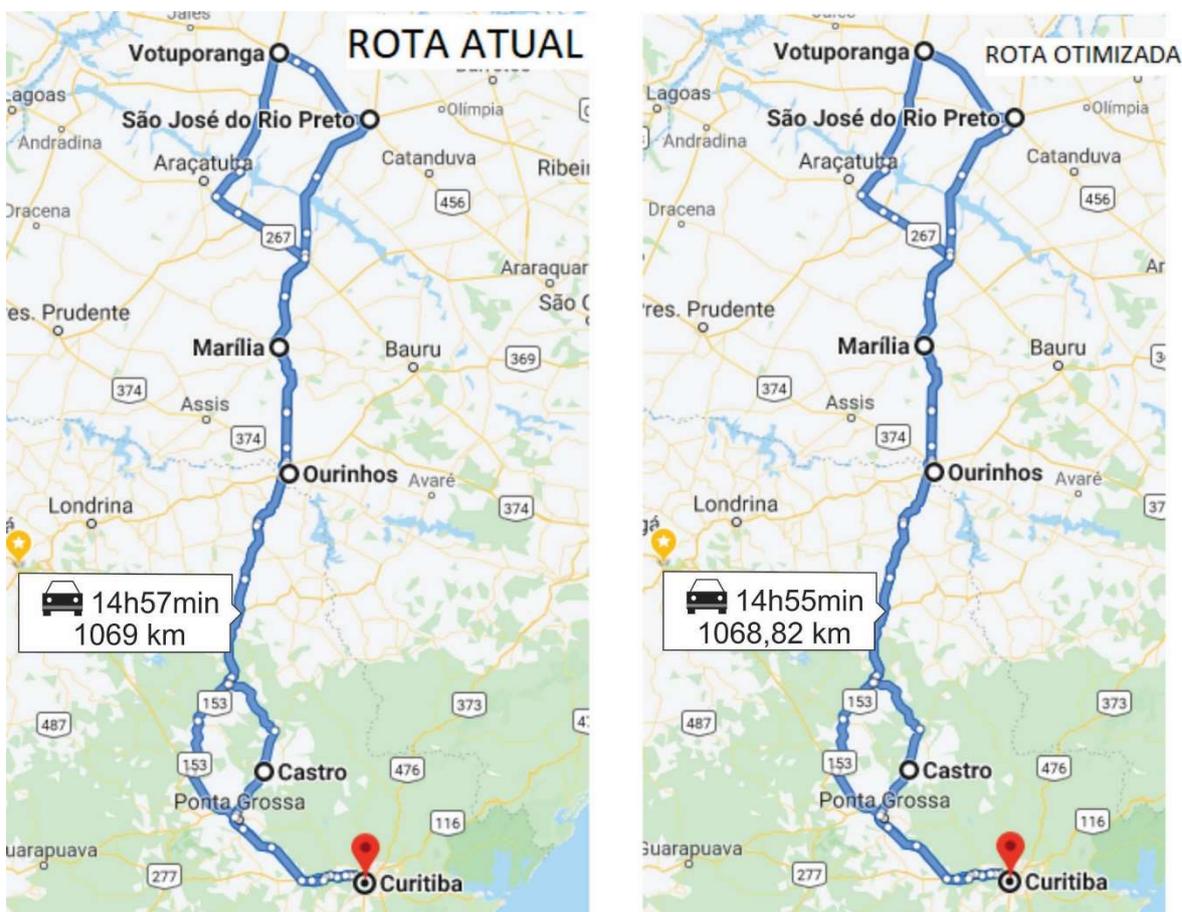
FONTE: Google Maps (2019).

FIGURA 22 - COMPARAÇÃO DO ROTIEIRO 4 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA.



FONTE: Google Maps (2019).

FIGURA 23 - COMPARAÇÃO DO ROTEIRO 5 COM A SOLUÇÃO PROPOSTA.



FONTE: Google Maps (2019).

Quatro, dos cinco roteiros tiveram reduções significativas em suas quilometragens de rodagem com a utilização do método exato *Branch and Bound* para a resolução do Problema do Caixeiro Viajante, entretanto, a proposta de otimização do roteiro 5, é praticamente igual ao que é feito pela empresa. Isso mostra que, quando poucas cidades compõem um determinado roteiro, isso favorece o empirismo, que é a designação de rotas sem nenhuma ferramenta de auxílio, e a proposta se equipara até mesmo as do método otimizado.

Porém, quando o número de cidades aumenta, a qualidade das soluções propostas pelos métodos de otimização é superior as análises feitas de maneira empírica, como pode ser visto na FIGURA 23, em que o roteiro possui poucas cidades, e a quilometragem total de rodagem se aproxima muito nos dois cenários. Já na FIGURA 19, é um roteiro que possui muitas cidades e a quilometragem total de rodagem do método otimizado é melhor, se comparado ao cenário atual.

5.1 REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ COM A OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS

Com base nos resultados obtidos pela otimização do trajeto atual realizado pela empresa, fica claro o quanto a utilização desses métodos reduz a quilometragem total de rodagem, cerca de 43,3% de redução em distância percorrida.

Porém, outro fator muito importante está atrelado a redução das distâncias, é a redução das emissões de gases do efeito estufa, provenientes da queima de combustíveis fósseis.

O objetivo é estimar a emissão de CO₂ resultante do transporte rodoviário de cargas no cenário atual, e mostrar as possíveis reduções no cenário em que forem adotadas as medidas de otimização para a redução de trajeto, o que por sua vez, resulta em uma redução do consumo de combustíveis.

O principal parâmetro utilizado para mensurar as emissões, foram as distâncias percorridas, o consumo do combustível e o tipo de combustível, que foram obtidos junto a empresa.

Como base para a comparação, foi utilizado a unidade chamada CO₂ equivalente que, para Bartholomeu (2016), consiste em uma medida métrica de comparação em relação às emissões de vários gases do efeito estufa. O CO₂ equivalente é o produto da multiplicação das toneladas emitidas de gases de efeito estufa pelo seu potencial de aquecimento global, segundo o Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM).

Utilizando o software *SimaPro*®, que é um programa para analisar o desempenho ambiental de produtos e serviços, e com o auxílio da metodologia IPCC 2013, que é um suplemento do ano de 2013 às próprias diretrizes já existentes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) para o Inventário Nacional dos Gases do Efeito Estufa (TFI) temos os seguintes dados de emissões de CO₂.

TABELA 19 – EMISSÕES DE CO₂ EQUIVALENTE POR QUILOMETRAGEM TOTAL DE RODAGEM.

Índice utilizado	Método	Distância Percorrida	Unidade	Total
IPCC GWP 100a	B&B	4760,57 Km	kg CO ₂ eq	265,36
IPCC GWP 100a	Nearest Neighbor	5530,23 Km	kg CO ₂ eq	308,35

IPCC GWP 100a	Atual	8398,00 Km	kg CO ₂ eq	468,43
---------------	-------	------------	-----------------------	--------

FONTE: Autor (2019).

Olhando para a TABELA 19, vemos que a redução das emissões de poluentes somente por otimizar as rotas de transporte podem chegar a 13% menos de kg CO₂ equivalente na atmosfera, somente comparando os dois métodos de otimização. Quando compararmos a solução ótima, que nesse caso foi obtida via método exato *Branch and Bound*, com a quilometragem que atualmente é realizado pela empresa, essa redução é ainda maior, chegando a 40,2% menos de emissões de CO₂ equivalente, se realizado o roteiro proposto pelo método exato *Branch and Bound*.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entender os desafios para distribuir seus produtos aumenta as possibilidades desse segmento se destacar dos seus concorrentes, tudo porque um dos fatores mais custosos para as pequenas e médias empresas é o transporte rodoviário dos seus produtos ou serviços.

Conhecer essas ferramentas e métodos de otimização, além de orientar a escolha de melhores rotas de transporte, traz consigo ganhos relacionados também na redução do impacto ambiental advindo do consumo de combustíveis fósseis.

Ao longo desse trabalho foi apresentado o Problema do Caixeiro Viajante. Um método exato de resolução, o algoritmo *Branch and Bound*. Três métodos de resolução heurísticos, o *Cheapest Insertion*, *Nearest Neighbor* e *Farthest Insertion*, e um algoritmo de busca local, o *K-opt*.

Todas as técnicas de otimização propostas por esse trabalho, para a resolução do problema de rotas de uma empresa do setor de embalagens de madeira, geraram números de quilometragem total de rodagem melhores, ou seja, mais baixos se comparado aos que são atualmente usados.

De modo que, a melhor rota se deu por meio do algoritmo exato *Branch and Bound*, que se aplicado, pode gerar uma redução de 43,3% de quilometragem total de rodagem e uma redução de 40,2% de emissões de CO₂ equivalente, que são os poluentes causadores do efeito estufa.

Considerando os objetivos específicos desse trabalho e suas limitações, mostra-se de forma geral que existem melhores maneiras de se escolher os roteiros de distribuição da empresa, se comparada a forma empírica utilizada atualmente, e as quilometragens total de rodagem.

Nesse sentido, a redução dos números de quilometragem total de rodagem, traz consigo também a redução dos custos da realização desse serviço, e mostra que, um dos maiores desafios da distribuição de produtos e serviços, e que impactam diretamente no custo final repassado na maioria das vezes aos consumidores, pode ser trabalhado de uma forma mais técnica e modelada, com conceitos de otimização, e sempre em busca de melhores resultados para garantir uma maior eficiência operacional e redução do custo desse serviço.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F.; LIMA, A. A.; LIMA, M. A. C. **Otimização de rota e redução dos custos logísticos: estudo de caso em uma empresa de contabilidade.** *Brazilian Journal of Development*. Braz. J. of Develop, v. 4, ed. 1, p. 136-144, Jan/Mar 2017.
- ARENALES, M. N.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. **Pesquisa Operacional**. 8. ed. Rio de Janeiro. Editora: Campus/Elsevier, 2011. 536.
- BALBAERT, Ivo et al. **Getting Started with Julia programming**. Birmingham, Packt Publishing., p. 30-35. 2015.
- BALLOU, R. H. **Business logistics/Supply Chain management**. 5 ed. 2004.
- BARTHOLOMEU, D. B.; PERA, T. G.; CAIXETA FILHO, J. V.; **Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO2 no transporte rodoviário de cargas**. J. Transp. Lit. Manaus, v. 10, n. 3, p. 15-19. 2016.
- BENEVIDES, P.F.; **Aplicação de heurísticas e metaheurísticas para o problema do Caixeiro Viajante em um problema real de roteirização de veículos. Dissertação de mestrado**. Curitiba, BR: UFPR, 2011.
- BERTAGLIA, P. R.; **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimento**. 3 ed. 2016. Saraiva. São Paulo.
- BEZANSON, Jeff. et al.; **Julia: A fresh approach to numerical computing**. MIT and Julia Computing. 2015.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; **Logistical management: the integrated supply chain process**. 3 ed. McGraw Hill: New York, 1996.
- CASTELLUCCI, P. B.; **Julia e JuMP: Novas ferramentas para programação matemática. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**. Vol. 9, n. 2, p. 48-61, 2017.
- CNT – Confederação Nacional dos Transportes. **Conjuntura do Transporte: Macroeconomia**. Jun., 2018.
- CUNHA, C. B.; BONASSER, U. O.; ABRAHÃO, F. T. M.; **Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o Problema do Caixeiro Viajante**. XVI Congresso da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Natal, 2002.
- DASKIN, M.S.; **Logistics: an overview of the state of the art and perspectives on future research**. *Transportation Research*. v.19, n.5/6, 1985.
- DIAS, S. N. S. **Estudo de um problema de rotas de uma empresa de confecção de roupas infantis**. Universidade Federal do Paraná – Jandaia do Sul, 2018.
- FERNANDO, P. H. L. et al.; **O Problema do Caixeiro Viajante aplicado na distribuição de peças/componentes do almoxarifado para a montagem de**

caminhões especiais em uma linha de produção na indústria automobilística. IFSP. Sinergia, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 63-74, Jan./mar. 2016.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L.; **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

HELGAUN, K.; **An effective implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic.** *European Journal of Operational Research*, v.126, p.106-130. 2000.

IPAM – Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia. Glossário. 2018

JUNQUEIRA, R. Á; MORABITO, R.; **Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho.** Revista Produção. v. 16, n. 3 p. 510-525. Set./Dez 2006.

KRETZSCHMAR, L. A.; NUNES, L. F.; COSTA, BENEVIDES, P. F.; BERTHOLDI, D. M.; **Análise de resultados na construção de rota para o Problema do Caixeiro Viajante.** Congresso de Matemática Aplicada e Computacional. CMAC Sudeste. 2013.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.Y.; SEMET, E F.; **Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem.** *International Transactions in Operational Research*, v.7, n4/5, p.285-300. 2000.

LIN, S.; Kernighan B. W.; **An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem.** *Operations Research*, v.21, p.498-516. 1973.

LOUCANOVA, E; PAROBK, J; PALUŠ, H; KALAMÁROVA, M.; **Logistics as a Part of Innovation Process.** *Acta Logistic - International Scientific Journal about Logistics.* Vol. 3. p. 1-4. 2016.

MARTINS, R.; **Custos e Processos Logísticos: Quais são os custos logísticos no transporte rodoviário.** São Paulo – SP. 2017.

MELO, D. J. *et al.*; **Aplicação da Programação Linear para atendimento de demanda e otimização de recursos em uma empresa de autopeças.** XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Joinville. 2017.

MESTRIA, Mário. **Um método exato para o Problema do Caixeiro Viajante com grupamentos euclidiano e simétrico.** XXXV CNMAC, Natal-RN, 2014.

MORABITO, R. **Modelos probabilísticos aplicados a Engenharia de Produção.** Edfscar. 1 ed. 2006.

NOVAES, Antonio. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição.** 4 ed. 2015. Elsevier. Rio de Janeiro.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A.; **Técnicas de Otimização.** LTC Editora, 2009.

PRADO, D. S.; **Programação Linear.** Editora Falconi. 7ed. v 1. 2016.

RIBEIRO, A. L. R.; ***Simulated Annealing* aplicado ao Problema do Caixeiro Viajante**. Universidade Federal de Juiz De Fora. Juiz de Fora. 2018

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil e à logística internacional**. 4 ed. São Paulo: Aduaneiras, 2007.

ROSA, Adriano. **Gestão do Transporte na Logística de Distribuição Física: uma análise da minimização do custo operacional**. Taubaté: 2007.

SEBRAE – Serviço brasileiro de apoio às micro e pequenas empresas. Participação das micro e pequenas empresas na economia brasileira. FGV. 2015.

SILVA, E. L; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª Edição. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, G. A. N.; SILVA, F. A.; RUSSI, D. T. A.; PAZOTI, M. A.; SISCOOTTO, R. A.; **Algoritmos heurísticos construtivos aplicados ao Problema do Caixeiro Viajante para a definição de rotas otimizadas**. Colloquium Exactarum, v. 5, n.2, Dez. 2013, p.30.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8ª Edição. São Paulo: Pearson, 2008.

TAYLOR, B. W.; ***Introduction to Management Science. Integer Programming: The Branch and Bound Method***. 11 ed. Pearson. 2015.