

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GABRIEL LEITES SOUZA

Modelagem Matemática Para a Roteirização de Veículos: Aplicação em Uma
Empresa Prestadora de Serviço de Transporte Fretado de Pessoas

Caçador
2021

GABRIEL LEITES SOUZA

Modelagem Matemática Para a Roteirização de Veículos: Aplicação em Uma
Empresa Prestadora de Serviço de Transporte Fretado de Pessoas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção, do campus caçador do Instituto Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. MSc Bruno Santos Vieira

Caçador
2021

Souza, Gabriel Leites
S729m Modelagem matemática para a roteirização de veículos : aplicação em uma empresa prestadora de serviço de transporte fretado de pessoas./ Gabriel Leites Souza ; orientador : Bruno Santos Vieira. -- Caçador, SC, 2021.
67 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Produção.
Inclui bibliografias

1. Engenharia de produção. 2. Roteirização de veículos. 3. Transporte de funcionários. I. Vieira, Bruno Santos. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Curso de Engenharia de Produção. III. Título.

CDD 658.5

Gabriel Leites Souza

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS: APLICAÇÃO EM
UMA EMPRESA PRESTADORA DE SERVIÇO DE TRANSPORTE FRETADO DE PESSOAS**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Engenharia de
Produção, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Caçador, 25 de fevereiro de 2022.

**BRUNO
SANTOS
VIEIRA:**
07536969910

Assinado digitalmente por BRUNO SANTOS
VIEIRA:07536969910
DN: C=BR, O=ICP-Brasil, OU=presencial,
OU=34028316000103, OU=Secretaria da
Receita Federal do Brasil - RFB,
OU=ARCORREIOS, OU=RFB e-CPF A3,
CN=BRUNO SANTOS VIEIRA:07536969910
Ração: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura
aqui
Data: 2022.02.25 15:22:58-0300'
Font: PDF Reader Versão: 11.2.1

Prof. Me. Bruno dos Santos Vieira
Instituto Federal de Santa Catarina
Orientador

Prof. Me. Carlos Henrique Radavelli
Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
CLEBER SCHAEFER BARBARESCO
Data: 02/03/2022 11:16:48-0300
CPF: 043.838.759-71
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Me. Cleber Schaefer Barbaresco
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família e amigos que sempre me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudo.

A toda minha família, sobretudo a minha mãe Adriana (in memorian), que não está mais entre nós, mas continua sendo minha maior força na vida. Sua lembrança me inspira e me faz persistir.

Referencio o Professor MSc. Bruno Santos Vieira pela orientação neste trabalho, pela dedicação e, sobretudo, pelos momentos de aprendizado.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia de Produção do IFSC, em especial aos professores: Dr. Vitor Sales Dias da Rosa e MSc. Francisco Sartori, que contribuíram significativamente para meu crescimento intelectual, e por meio deles eu me reporto a toda comunidade do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descoberta e aprendizado e por todo companheirismo ao longo deste percurso.

A todos da empresa Auto Coletivo Caçador, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento possibilitando a realização deste trabalho.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá." (Ayrton Senna)

RESUMO

O crescimento de empresas e indústrias cada vez mais distantes dos centros urbanos trouxe uma preocupação por parte dos empresários em como viabilizar o transporte dos seus funcionários até as empresas. Este trabalho busca, a partir da aplicação de um modelo matemático, definir e propor nova rota para o processo de deslocamento dos colaboradores no trajeto de suas residências até o trabalho e vice-versa, em uma empresa prestadora do serviço de transporte fretado de passageiros situada na cidade de Caçador. Para isso, construiu-se um modelo matemático baseado na formulação dos autores Miller, Tucker e Zemlin para problema do caixeiro viajante, respeitando todas as restrições presentes no problema. O modelo matemático foi então validado mediante a sua aplicação no problema em estudo, com o auxílio do software GAMS IDE. O método mostrou-se eficaz no que tange a redução de trajetos, influenciando na redução de 4% da distância total percorrida para realizar a rota.

Palavras-chave: Roteirização de veículos; transporte de funcionários; Caixeiro viajante.

ABSTRACT

The growth of companies and industries more and more distant from urban centers has brought a concern on the part of entrepreneurs to make the transport of their employees to the companies viable. This work seeks, from the application of a mathematical model, to define and propose a new route for the process of displacement of employees on the way from their homes to work and vice versa, in a company that provides a chartered passenger transport service located in the town of Caçador. For this, a mathematical model was built based on the formulation of the authors Miller, Tucker and Zemlin for the traveling salesman problem, respecting all the restrictions present in the problem. The mathematical model was then validated by applying it to the problem under study, with the aid of the GAMS IDE software. The method proved to be effective in terms of reducing paths, influencing a 4% reduction in the total distance covered to perform the route.

Keywords: Vehicle Routing; transport of employees; traveling salesman.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Pôster do Departamento de Trânsito de Munique, 2001.....	17
Tabela 1 — Espaço viário utilizado por passageiro no automóvel e no ônibus . . .	24
Tabela 2 — Emissões de CO ² (Kg CO ² /Km) por passageiro no automóvel e no ônibus	24
Figura 2 — Caracterização da pesquisa	36
Figura 3 — Etapas da pesquisa	38
Figura 4 — Pontos de coleta	43
Tabela 3 — Matriz distâncias em quilômetro	44
Figura 5 — Distância do P5 para o P0 no Google Maps	45
Tabela 4 — Plano atual de rotas	46
Figura 6 — Rota atual representada com auxílio de Google Maps	47
Figura 7 — Modelo de programação no GAMS	53
Tabela 5 — Matriz binária de saída	54
Figura 8 — Rota otimizada	55
Figura 9 — Adição de novos pontos (P8 e P9)	56
Figura 10 — Modelo matemático implementado no GAMS	58
Figura 11 — Dados da resolução do modelo	59
Tabela 6 — Rota ótima	60
Figura 12 — Rota proposta após modificações	61
Tabela 7 — Comparação entre a rota atual e a proposta	61

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 —	33
Equação 2 —	33
Equação 3 —	33
Equação 4 —	33
Equação 5 —	33
Equação 6 —	34
Equação 7 —	34
Equação 8 —	48
Equação 9 —	49
Equação 10 —	49
Equação 11 —	50
Equação 12 —	50
Equação 13 —	50
Equação 14 —	51
Equação 15 —	51
Equação 16 —	51
Equação 17 —	51
Equação 18 —	52
Equação 19 —	52
Equação 20 —	52
Equação 21 —	57
Equação 22 —	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Classificação dos modos de transporte	21
Quadro 2 — Benefícios do serviço de ônibus e vans fretadas no condado de São Francisco	23
Quadro 3 — Características dos problemas de roteirização e programação.	26
Quadro 4 — Principais tipos de Problemas de Roteirização de Veículos	32
Quadro 5 — Itinerário da rota madeireira Seleme	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NP-Difícil	Tempo polinomial não determinística – Difícil
CNT	Confederação Nacional do Transporte
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITDP	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
PCC	Problema do Carteiro Chinês
PCCC	Problema do Carteiro Chinês Capacitado
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PMCV	Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes
PPVDU	Problema de Programação de Veículos com um Único Depósito
PPVMD	Problema de Programação de Veículos com Múltiplos Depósitos
PPVMV	Problema de Programação de Veículos com Múltiplos Tipos de Veículos
PPVRDV	Problema de Programação de Veículos com Restrições de Comprimento de Rota
PRV	Problema de Roteamento de Veículos
PRVMD	Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos
PRVT	Problemas de programação de veículos e tripulações
VMT	Milhas percorridas por veículos
MIP	Mixed Integer Linear Programming

LISTA DE SÍMBOLOS

CO^2	Dióxido de carbono
m^2	Metro quadrado
%	Porcentual
Σ	Somatório
=	Igual
\leq	Menor igual
\neq	Diferente
+	Adição
-	Subtração
\in	Pertence
\geq	Maior igual
\forall	Para todo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	18
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos Específicos	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	TRANSPORTE FRETADO	20
2.1.1	Classificação dos modos de transporte	20
2.2	TRANSPORTE FRETADO DE PESSOAS	21
2.2.1	Características do serviço de fretamento	22
2.2.2	Vantagens do serviço de fretamento	22
2.3	PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS	24
2.3.1	Classificação dos Problemas de Roteirização de Veículos	27
2.3.2	Tipos de Problemas de Roteirização de Veículos	29
2.3.3	Formulação Matemática do PCV	32
2.3.3.1	Descrição da restrição de eliminação de sub ciclos	34
2.3.4	Complexidade do problema	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	36
3.2	ETAPAS DA PESQUISA	37
4	RESULTADOS	40
4.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	40
4.2	COLETA DE DADOS	41
4.2.1	Pontos de Coleta	41
4.2.2	Matriz de distâncias	43
4.2.3	Plano atual de rotas	45
4.3	MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA	47
4.3.1	Definição do modelo de programação linear adequado	48
4.3.2	Construção do Modelo matemático	48
4.3.3	Variáveis do problema	48
4.3.4	Restrições	49
4.3.4.1	Restrições de visita	49
4.3.4.2	Restrição de sub ciclos	49
4.3.4.3	Integralidade das variáveis	50

4.3.5	Função Objetivo	50
4.3.6	Modelo Matemático completo	51
4.4	VALIDAÇÃO DO MODELO	52
4.5	APLICAÇÃO DO MODELO	54
4.6	ANÁLISE DA VIABILIDADE DOS RESULTADOS OBTIDOS	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana, descrita como o processo de movimentação de pessoas em cidades, vem se tornando um fator crítico nos principais conglomerados urbanos em todo o mundo, em virtude da crescente dificuldade de deslocamento (Reis, 2014). Reflexo principalmente do intenso e acelerado processo de urbanização e crescimento desordenado das cidades, além do uso cada vez mais alto do transporte motorizado individual pela população.

A grande expansão das cidades brasileiras desencadeou em problemas enfrentados diariamente pela população, o que caracteriza um enorme desafio à qualidade de vida, particularmente quanto aos aspectos sociais e ambientais. Para Magagnin e Silva (2008), o crescimento urbano desordenado, provocado pela dispersão espacial, o aumento excessivo na utilização do automóvel, a falta de infraestrutura dos centros urbanos, entre outras, são questões que interferem na qualidade de vida da população.

Em consequência desta expansão aliado ao forte avanço da industrialização brasileira, grandes fábricas buscam se localizar nos entornos de centros urbanos muitas vezes longe dos espaços urbanizados. Segundo Maior et.al (2019), este afastamento da capital acontece por diversos motivos como a dificuldade de encontrar espaços livres para a construção das fábricas dentro das metrópoles, o alto investimento necessário para a implantação da fábrica nesses centros, e a inserção das leis ambientais e sanitárias que exigem um distanciamento mínimo de locais povoados.

Em decorrência do deslocamento dessas indústrias, faz-se necessário que empresas avaliem meios de locomoção dos funcionários. Nesse contexto, o incentivo ao uso do carro particular pode ser uma das soluções. Porém, ao passo que o transporte por automóveis particulares cresce, aumenta também os congestionamentos, resultando em um tempo de viagem maior, e conseqüentemente a resistência ao serviço de transporte público, por tornar-se ainda mais lento e menos atrativo. Assim novas formas de deslocamento foram introduzidas no cenário da mobilidade urbana (PRETTO et al., 2021).

É nesse cenário que empresas que oferecem o serviço de transporte fretado de passageiros estão inseridas. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2017), essa modalidade permite os deslocamentos de grupos fechados, com itinerários fixos e flexibilidade de horários, como transporte de funcionários. Dessa forma, o sistema de transporte coletivo fretado é uma solução utilizada por várias empresas para transportar seus colaboradores até o serviço e levá-los de volta às suas casas ao final do expediente.

Com a disputa acirrada por espaço no mercado devido ao aumento de concorrência entre as empresas, oferecer um serviço que esteja dentro do preço com um ótimo nível de serviço tornou-se imprescindível para a sobrevivência das empresas prestadoras de serviço de transporte fretado de passageiros. Assim, segundo Tsuda (2007), as decisões relacionadas ao transporte são fundamentais no planejamento estratégico de logística, com destaque ao problema de roteirização de veículos.

Roteamento de veículos é um problema que busca minimizar custos de transporte, identificando a rota com o menor custo para atender uma determinada sequência de clientes e demais restrições que fazem parte do problema. De acordo com Miura (2003), a resolução deste tipo de problema, pode gerar grandes benefícios na redução de custos, tempo de transporte, ganho em produtividade operacional, resultando no aumento da satisfação dos clientes.

Particularmente, no caso de uma empresa prestadora de serviços de transporte fretado de passageiros, cujas atividades dependem fortemente da distribuição das rotas, a resolução de problemas de roteamento de veículos torna-se de extrema importância. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a aplicação de um modelo de roteirização de veículos, baseado no modelo matemático do caixeiro viajante para uma empresa dedicada ao serviço de transporte fretado de pessoas, AUTO COLETIVO, com foco em uma rota específica que transportam funcionários de uma empresa madeireira situada em Caçador-SC, de pontos próximos às respectivas residências até a empresa, e ao fim do expediente leva-os até os respectivos pontos.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Com o desenvolvimento da indústria associada ao êxodo rural, as cidades brasileiras cresceram excessivamente nas últimas décadas do século XX. De acordo com os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), em 2015 a grande maioria da população brasileira, cerca de 84,72%, vive em áreas urbanas. Já 15,28% dos brasileiros vivem em áreas rurais. Hoje, o deslocamento do campo para a cidade continua, porém, em percentuais menores.

Parte dos problemas urbanos vividos pela população brasileira hoje em dia é resultado do intenso processo de industrialização, sem que houvesse investimentos correspondentes na rede de infraestrutura urbana. Os sistemas de transporte urbano são um exemplo dessa desordem entre o crescimento populacional e territorial urbano acelerado e a falta de investimento em infraestrutura de transporte de massa.

Um fator que contribui significativamente para a deterioração do sistema de transporte urbano é a prioridade dada ao transporte individual em oposição ao interesse do transporte coletivo. O acréscimo do número de carros nas vias aumenta ainda mais os congestionamentos, de forma a dificultar a mobilidade urbana. O pôster do Departamento de Trânsito de Munique (Figura 1), tem o intuito de conscientizar os cidadãos que eles fazem parte do sistema de transporte e suas decisões afetam diretamente a eficiência do mesmo.

Figura 1 — Pôster do Departamento de Trânsito de Munique, 2001.



Fonte: Machado (2011)

O pôster traz comparação realizada entre os espaços que as pessoas ocupam no trânsito utilizando ônibus, bicicleta e carro, em que ressalta o espaço que 1 ônibus ocupa na via, 60 bicicletas ocupando um espaço um pouco maior, em comparação com 60 carros ocupando todo o espaço da via. Assim, a utilização dos ônibus dão uma significativa contribuição para a redução dos congestionamentos, por reduzirem a necessidade de veículos individuais.

Cidades cada vez mais cheias, trânsito estressante, oferta pouca e ruim de transporte público, tem tornado o deslocamento dos funcionários para seus locais de trabalho uma rotina desgastante. Garantir um transporte de qualidade é importante para qualquer empresa, visto que funcionários estressados e com cansaço físico,

acabam tendo diminuição na sua produtividade, acarretando prejuízos para a empresa.

Dessa forma, diversas empresas oferecem aos seus colaboradores o serviço de transporte fretado. Neste cenário, o veículo trafega por ruas previamente definidas realizando o embarque exclusivo dos trabalhadores pertencentes à organização contratante do serviço.

Este estudo pretende desenvolver um modelo matemático adequado à roteirização de veículos para coleta e distribuição de trabalhadores, buscando auxiliar os gestores e operadores a obter ganhos no planejamento e operação do sistema de transporte, por meio da construção de rotas mais eficientes e melhor aproveitamento dos veículos.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo limita-se à empresa Auto Coletivo, do setor de transporte de passageiros, situada em Caçador-SC. Esta empresa destina-se à prestação de serviço de transporte público e privado.

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção, serão apresentados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral propor um modelo matemático para o procedimento de roteirização do serviço de transporte fretado de passageiros em uma empresa situada em Caçador-SC.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, deverão ser atingidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema, visando estabelecer uma base para o desenvolvimento do trabalho;
- Levantar informações sobre o atual processo de roteirização da empresa em questão;

- Analisar os dados obtidos pelo levantamento de informações;
- Determinar o método para a definição da rota;
- Construir o modelo de programação, considerando as rotas propostas pela empresa;
- Validar o procedimento a ser proposto por meio de uma aplicação;
- Realizar a análise da viabilidade dos resultados;
- Comparar a rota atual com a rota proposta;

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema a ser tratado neste estudo, assim como a definição do problema, delimitação do estudo e os objetivos da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão teórica que norteia a pesquisa. Apresentando o sistema de transporte fretado, bem como sua classificação. Em seguida, exibe os problemas de roteirização de veículos, contextualizando os tipos de problemas de roteirização e a classificação dos mesmos.

O terceiro capítulo mostra a metodologia adotada na pesquisa, descrevendo a caracterização da mesma quanto à sua abordagem, finalidade, objetivos e procedimentos e, em seguida, são apresentadas as fases que a compõem.

O quarto capítulo apresenta detalhadamente as etapas para execução do trabalho, apresentando a descrição da empresa, a dinâmica utilizada na coleta de dados, a modelagem matemática proposta, em seguida e realizada a validação do modelo por meio de uma aplicação, e por fim e elaborada a análise da viabilidade dos resultados obtidos, juntamente com a comparação da rota atual com o rota proposta.

O quinto capítulo são delineadas as considerações finais e elencadas sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos relacionados ao tema deste trabalho, com a finalidade de criar uma base teórica que sirva de pilar para a aplicação do modelo matemático bem como para o entendimento de assuntos vinculados ao transporte fretado de pessoas e às ferramentas da pesquisa operacional necessárias à execução deste trabalho.

2.1 TRANSPORTE FRETADO

Diante do déficit presente no transporte público evidenciado no dia a dia dos trabalhadores, surge como alternativa de transporte, especialmente para a indústria, o transporte fretado de pessoas. Nesta seção são feitas as classificações dos modos de transporte, a partir da qual é realizada uma revisão bibliográfica acerca do transporte fretado de empregados, expondo seu surgimento, características e vantagens.

2.1.1 Classificação dos modos de transporte

A lei da Política Nacional da Mobilidade Urbana, sancionada em janeiro de 2012, classifica os serviços de transporte urbano quanto ao:

- Objeto - de passageiros ou cargas;
- Característica do serviço- coletivo ou individual;
- Natureza do serviço: público ou privado.

Deste modo o transporte de funcionários por fretamento é caracterizado como transporte privado coletivo de passageiros. De acordo com a lei Política Nacional da Mobilidade Urbano transporte privado coletivo é um serviço de transporte de passageiros não aberto ao público para a realização de viagens com características operacionais exclusivas para cada linha e demanda.

De acordo com Vasconcellos (2012) no Brasil existem três tipos de serviços fretados:

- Contínuo - Caso em que o ônibus transporta regularmente os empregados do cliente (caso de transporte de funcionários);
- Eventual - Quando o serviço é contratado para deslocamento eventual (caso de festas, passeios, turismo);

- Escolar - Quando o serviço se limita ao transporte de estudantes, de forma contínua.

Vuchic (2007) apresenta uma das classificações mais conhecidas sobre os modos de transporte urbano de passageiros. Esta classificação define que os modos de transporte são divididos em três grandes grupos: privado, público e semi-público (Quadro 1).

Quadro 1 — Classificação dos modos de transporte

Modo de transporte	Características	Exemplo
Privado	- Usuário é proprietário do veículo; - Flexibilidade no tempo e no espaço.	- A pé, automóvel e veículo com tração animal.
Público	- Veículos percorrem rotas e horários pré-definidos; - Veículos podem ser utilizados livremente pelos usuários perante ao pagamento de uma tarifa à operadora da linha; - Veículos de maior capacidade.	- Ônibus, metrô e trem, veículo leve sobre trilhos (VLT).
Semi-público	- Possuem características intermediárias entre o modo privado e público.	- Táxi, veículos fretados ou de aluguel.

Fonte: Vuchic (2007)

Vuchic (2007) classifica o modo de transporte de veículos fretados como semi-público e os caracteriza como um intermediário entre o privado e público.

De acordo com Ferraz e Torres (2004), os modos de transporte semi-públicos, que operam em complemento ao transporte coletivo público, são divididos em três grupos: privado com uso modificado, contratado e regular flexível. No subgrupo privado com uso modificado estão os carros alugados e utilizados em transporte solitário. O subgrupo contratado inclui as vans de transporte compartilhado e os veículos fretados. O subgrupo dos veículos regulares flexíveis englobam os serviços de moto táxi, transporte programado por telefone e as lotações que realizam transporte sem regulamentação.

2.2 TRANSPORTE FRETADO DE PESSOAS

De acordo com CNT (2017), o surgimento do transporte de passageiros em regime de fretamento no Brasil está diretamente ligada à demanda das grandes indústrias, notadamente automotivas, na região do ABC em São Paulo, na segunda

metade do século XX. Fatores locacionais, tais como a proximidade aos portos e a existência de incentivos fiscais acabaram por levar as fábricas e juntamente com elas um enorme número de funcionários a locais nem sempre atendidos por linhas regulares do transporte coletivo público.

Segundo a CNT (2017), com a escassez do transporte público na época, a contratação de empresas para realizar o transporte dos funcionários foi a solução encontrada pelas grandes indústrias para atender às jornadas de trabalho estabelecidas. A contratação de um transporte exclusivo é flexível e adaptável às necessidades da empresa, desta forma se torna a melhor alternativa para levar os funcionários aos locais de trabalho e de volta às suas respectivas casas nos diferentes turnos de produção.

2.2.1 Características do serviço de fretamento

Segundo Alvim (1995), sistema de fretamento é um serviço prestado por pessoa jurídica com a finalidade de acordo com os termos do contrato celebrado entre as partes, representando o interesse correspondente dos usuários e prestadores de serviços.

De acordo com a CNT (2017), transporte fretado de pessoas é um serviço que não está sujeito à regulação de preços e, portanto, não busca modalidade tarifária, uma das características do transporte público. O preço é negociado junto ao contrato de adesão ao serviço. Dessa forma de negociação é que deriva o nome do serviço: “fretamento”, uma vez que “fretar” significa “ceder ou tomar a frete”, que é o valor pago a alguém para se transportar algo.

2.2.2 Vantagens do serviço de fretamento

De acordo com Lima (2001), Com a intenção de atrair usuários de veículos particulares para o sistema de transporte fretado, as empresas prestadoras deste tipo de serviço, divulgam aos seus clientes algumas vantagens quanto a utilização do ônibus, como: Solução para redução de engarrafamentos, rodízios, acidentes de trânsito, estresse, horas perdidas no trânsito, pedágio, má qualidade de vida, dentre outras.

De acordo com Leal (2012) à agência de transporte local *San Francisco County Transportation Authority* do condado de São Francisco, após uma extensiva rodada de consultas a diversas partes interessadas, incluindo autoridades públicas do setor de transporte, operadores e usuários de serviço de fretamento, a agência elencou uma série de aspectos positivos na atuação dos veículos fretados. No

Quadro 2 são destacados os principais benefícios e impactos do serviço de fretamento.

Quadro 2 — Benefícios do serviço de ônibus e vans fretadas no condado de São Francisco

Benefícios	Evidências/Exemplos
Eficiência na ocupação	O fator de ocupação é uma indicação de eficiência operacional, e, nesse aspecto, os veículos fretados estão em vantagem em relação ao automóvel.
Viagens de carro evitadas	Em uma pesquisa sobre o setor, 63% dos passageiros de ônibus fretados afirmaram que, se não usassem o serviço, estariam dirigindo sozinhos para o trabalho. A agência de transporte local calcula que o serviço de fretamento evitou cerca de 327000 deslocamentos de carro com um único ocupante por ano.
Milhas percorridas por veículos (VMT) evitadas	Multiplicando o número de passageiros pelas distâncias de suas residências aos respectivos locais de trabalho, os programas de fretamento pesquisados somam um total de 20 milhões de VMT evitadas.
Redução de emissões de CO ²	O estudo estima que os programas de fretamento na cidade foram responsáveis por uma redução de 8000 a 9500 ton/ano, considerando um cenário em que parte dos passageiros teriam optado por dirigir sozinhos.
Recrutamento e retenção de funcionários	Empresas que oferecem serviço de fretamento afirmam que esse é considerado um dos principais benefícios oferecidos a seus funcionários e potenciais contratados. A pesquisa do estudo apontou que cerca de 14% dos funcionários afirmaram que trocariam de emprego se o serviço de fretado que dispõe atualmente fosse terminado.

Fonte: Leal (2012)

Segundo a CNT (2017), estima-se que, no transporte por ônibus, o espaço viário utilizado por passageiro seja cerca de seis vezes inferior ao utilizado pelo usuário do automóvel particular. Enquanto o ônibus utiliza aproximadamente 10 m² (considerando uma ocupação de 45 passageiros/veículo), o usuário do automóvel utiliza 60 m² (considerando uma ocupação média de 1,3 passageiros/veículo, geralmente observada nos grandes centros urbanos) (Tabela 1).

Tabela 1 — Espaço viário utilizado por passageiro no automóvel e no ônibus

Automóvel		Ônibus	
Ocupação média (1,3 pass./veículo)	Ocupação máxima/ideal (5 pass./veículo)	Ocupação baixa/ Capacidade ociosa (15 pass./veículo)	Ocupação máxima (45 pass./veículo)
60 m ²	20 m ²	28 m ²	10 m ²

Fonte: Elaboração CNT com dados do ITDP (2016)

De acordo com um levantamento realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2011), mostrou que, enquanto um ônibus emite cerca de 1,28 Kg de CO²/Km, um automóvel emite 0,19 Kg de CO²/Km. Considerando os índices de ocupação apresentados na tabela 1, é possível verificar que, em uma operação do transporte coletivo em sua ocupação máxima, são emitidos aproximadamente 80% menos poluentes por passageiro em relação ao transporte individual, em sua ocupação média conforme a tabela 2.

Tabela 2 — Emissões de CO² (Kg CO²/Km) por passageiro no automóvel e no ônibus

Automóvel		Ônibus	
Ocupação média (1,3 pass./veículo)	Ocupação máxima/ideal (5 pass./veículo)	Ocupação baixa/ Capacidade ociosa (15 pass./veículo)	Ocupação máxima (45 pass./veículo)
0,146 Kg CO ² /Km	0,038 Kg CO ² /Km	0,085 Kg CO ² /Km	0,026 Kg CO ² /Km

Fonte: Elaboração CNT com dados do ITDP (2016) e IPEA (2011)

Dados os benefícios da utilização dos transportes coletivo, é importante incentivar a sua utilização e investir em sua ampliação em relação ao prejuízo causado pela utilização do transporte individual. O transporte em regime de fretamento, nesse sentido, exerce um papel complementar aos serviços de transporte público, atendendo as demandas menos expressivas de deslocamento e com maior eficiência oferecendo um serviço de grande conforto e qualidade.

2.3 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

Segundo Cunha (1997), o termo roteirização de veículos é a forma que vem

sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” para caracterizar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geometricamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. Quando a definição dos roteiros envolve não só aspectos espaciais ou geográficos, mas também temporais, como restrições de horários de atendimento nos pontos a serem visitados, os problemas são então denominados roteirização e programação de veículos.

Para Cordeu et al. (2007), o Problema de Roteamento de Veículos - PRV faz parte do gerenciamento de distribuição. Este problema é enfrentado a cada dia por milhares de empresas e organizações engajadas na entrega e coleta de bens ou pessoas. Suas condições variam de acordo com a sua aplicabilidade, os objetivos e restrições encontrados na prática são altamente variáveis.

De acordo com Toth e Vigo (2002), o PRV exige a determinação do conjunto ideal de rotas a serem realizadas por uma frota de veículos para atender um determinado conjunto de clientes, é um dos problemas de otimização combinatória mais importantes e estudados.

Baker e Ayechew (2003), complementam que o Problema básico de Roteamento de Veículos é encontrar um conjunto de rotas de entrega que atendam a requisitos e com custo total mínimo. Na prática, isso é equivalente a minimizar a distância total percorrida, ou a minimizar o número de veículos usados e em seguida, minimizando a distância total para este número de veículos.

Segundo Campelo et al.(2019), desde a introdução do tema por Dantzig e Ramser em 1959, onde eles escreveram uma aplicação do mundo real relativa ao fornecimento de gasolina a estações de serviço conhecido como o problema de “despacho de caminhões” e propuseram a primeira formulação matemática de programação e algoritmo abordagem rítmica, a comunidade de pesquisa tem estudado extensivamente diferentes variantes do Problema de Roteamento de Veículos. Como esperado, a complexidade dos desafios enfrentados também passou por um aumento significativo conforme o valor das técnicas de otimização.

A roteirização de veículos abrange um conjunto muito grande com diversos tipos de problemas abordados. Estes problemas apresentam algumas características (Quadro 3) que segundo Bodin et al. (1983), são apresentadas de acordo com critérios e descrições que podem ser usadas para modelar os problemas reais.

Quadro 3 — Características dos problemas de roteirização e programação. (continua)

Características	Possibilidades
Tamanho da frota disponível	<ul style="list-style-type: none"> - Um veículo - Vários veículos
Tipo de frota disponível	<ul style="list-style-type: none"> - Homogênea (somente um tipo de veículo) - Heterogênea (vários tipos de veículo) - Veículos especiais (dividido em compartimentos)
Garagem dos veículos	<ul style="list-style-type: none"> - Um único depósito - Vários depósitos
Natureza da demanda	<ul style="list-style-type: none"> - Determinística - Probabilística - Parcialmente satisfeita
Localização da demanda	<ul style="list-style-type: none"> - Nos nós (não necessariamente em todos) - Nos arcos (não necessariamente em todos) - Misto
Característica da rede	<ul style="list-style-type: none"> - Não orientada - Orientada - Mista - Euclidiana
Restrições de capacidade do veículo	<ul style="list-style-type: none"> - Impostas (veículos com a mesma capacidade) - Impostas (veículos com diferentes capacidades) - Não impostas (capacidade ilimitada)
Tempo máximo de rotas	<ul style="list-style-type: none"> - Impostas (rotas com mesmo tempo máximo) - Impostas (rotas com diferentes tempos máximos) - Não impostas (capacidade ilimitada)
Operações envolvidas	<ul style="list-style-type: none"> - Somente coletas - Somente entregas - Mistas
Custos	<ul style="list-style-type: none"> - Variáveis ou custos de roteirização - Fixos de operação ou custos de aquisição dos veículos - Custos comuns de transporte
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar os custos totais de roteirização

Quadro 3 — Características dos problemas de roteirização e programação. (conclusão)

Características	Possibilidades
	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar a soma dos custos fixos e variáveis - Minimizar o número necessário de veículos - Maximizar a função utilizada pelo cliente

Fonte: BODIN et al. (1983)

Para Naruo (2003), Todos os sistemas de roteirização e programação possuem saídas iguais, essencialmente o mesmo: para cada veículo ou tripulante, uma rota e um programa são providenciados. Em suma, a rota específica gera a sequência de locais a serem visitados, e o programa identifica os tempos nos locais em que as atividades são realizadas.

2.3.1 Classificação dos Problemas de Roteirização de Veículos

Conforme Cunha (2000), a roteirização de veículos envolve um conjunto de diversos tipos de problemas. Na literatura é possível encontrar um grande número de propostas que buscam classificar os variados tipos de problemas. Algumas destas abordagens serão descritas no presente tópico.

Um dos primeiros trabalhos que retrata a modelagem de problemas de roteirização de veículos e tripulações foi apresentado por Bodin et al. (1983) . Este trabalho é considerado uma das importantes referências por diversos autores. Para os autores os problemas de roteirização podem ser classificados em três grupos principais:

- Problemas de roteirização pura de veículos ou PRV: São os que consideram apenas aspectos espaciais na construção da melhor rota, ou seja, não há restrições temporais por parte dos clientes e nem relações de precedência entre os clientes, por exemplo, não é necessário atender um cliente antes ou depois de determinado cliente;
- Problemas de programação de veículos e tripulações (PRVT): São as que apresentam restrições espaciais geográficas e temporais para a elaboração das rotas, ou seja, ao definir a rota deve ser levado em consideração os horários determinados para realização de cada atividade. por exemplo, horário de chegada e saída, limite de tempo para permanecer em determinado local. Problemas de programação de veículos e tripulações são encontrados na maioria dos meios de transporte;
- Problemas combinados de roteirização e programação de veículos: São

problemas que combinam restrições de precedência de atendimento, quando se faz necessário realizar uma tarefa antes da outra, com restrições de janela de tempo.

Na última categoria temos os problemas que ocorrem na prática, como por exemplo: O problema de roteirização e programação de transporte fretado de pessoas; O problema de roteirização e programação de vans escolares.

De acordo com Ronen (1988), a classificação dos problemas de roteamento e programação se diferem um do outro pela forma em que são baseadas nos ambientes operacionais e objetivos, o autor considera a seguinte classificação:

- Problemas relativo a transporte de passageiros: Linha de ônibus, operam de acordo com o itinerário; serviços de Táxis, atendem a demanda quando forem solicitados em um local geográfico específico; Transporte de escolares por ônibus, onde a demanda é conhecida;
- Problemas de operações de serviço: Definição de rota de equipes responsáveis por reparos ou de serviços públicos, como exemplo, rotas de patrulhamento, reparo em vias públicas, coleta de lixo, entre outros;
- Problemas de roteamento e programação de caminhão ou transporte de cargas: entrega e ou coleta de mercadorias.

Segundo Golden, Dearmon e Baker.(1983), o roteamento de veículos podem ser classificados em problemas contendo cobertura de nós e problemas envolvendo cobertura de vias ou arco:

- Problema de cobertura de nós: Onde deve-se visitar cada nó em uma rede e retornar ao ponto de partida na menor distância possível, levando em consideração as restrições de capacidade do veículo e a carga de trabalho dos funcionários;
- Neste problema, enquadra-se dois problemas de roteamento bem conhecidos, o problema do caixeiro viajante (PCV) e o problema de roteirização de veículos com um único depósito e vários veículos .
- Problema de cobertura de vias (arcos): O problema de cobrir cada arco em uma determinada rede e retornar ao ponto de partida, minimizando a distância total percorrida.

Um exemplo clássico do problema de cobertura de vias é o problema do carteiro chinês (PCC). O PCC consiste em encontrar a melhor rota de percurso

mínimo, dentro de uma rede, passando ao longo de cada arco pelo menos uma vez.

2.3.2 Tipos de Problemas de Roteirização de Veículos

Com base na classificação dos autores Bodin et al.(1983), esta subseção apresenta os principais tipos de roteirização e programação de veículos.

Problemas de Roteirização Pura

- Problema do Caixeiro Viajante (PCV): O problema pode ser simplesmente descrito como: Se um vendedor deseja visitar exatamente uma vez cada cidade de uma lista de m cidades e depois voltar para a cidade de origem, qual rota, ele deve escolher a fim de minimizar o total da distância percorrida? (Hoffman; Padberg; Rinaldi, 2001). Neste problema todos os nós devem ser visitados somente uma vez, não há outra restrição. O PCV é considerado um problema de cobertura de nós;
- Problema do Carteiro Chinês (PCC): O objetivo deste problema é encontrar a mínima distância possível para que o carteiro seja capaz de percorrer as ruas de uma cidade desde o início de sua jornada até a entrega de todos artigos (Majumber; Kar; Pal, 2019). O PCC é um problema de cobertura de arcos. Algumas situações podem ser usadas como exemplo do PCC: serviço de coleta de lixo, varrição de rua, entre outros;
- Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes (PMCV): É uma variação do PCV, onde há a necessidade de levar em consideração mais de um caixeiro viajante, no qual eles devem visitar todos os nós da rede, saindo do depósito e retornando ao mesmo. Comparado ao PCV, o PMCV é mais adequada para determinadas modelagem de muitas situações práticas, pois é capaz de lidar com mais de um vendedor (Yuan et al., 2013);
- Problema de Roteirização de Veículos (PRV): Este problema consiste em determinar rotas ideais de coleta de um depósito central para um conjunto de determinados clientes dispersos geograficamente, sujeito a várias restrições como: extensão da rota, capacidade de veículo, janelas de tempo, relações de precedência entre clientes, entre outras (Laporte, 2007);
- Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (PRVMD): É uma variante do PRV, onde depósitos atuam como instalações intermediárias, sendo capaz de servir de reabastecimento ao longo da rota de um veículo, deste modo os clientes devem ser atendidos por um dos diversos

depósitos pertencentes à empresa (Crevier; Cordeu; Laporte, 2007) . Assim como no PRV, cada veículo deve sair e retornar ao mesmo depósito e a capacidade dos veículos deve ser respeitada;

- Problema do Carteiro Chinês Capacitado (PCCC): É um importante problema de roteamento de arco, onde as demandas localizadas em arcos de uma rede devem ser atendidas por veículos com capacidade limitada a um custo total mínimo (Assad; Pearn; Golden, 1987).

Problemas de Programação

- Problema de Programação de Veículos com um Único Depósito (PPVDU): Consiste na disposição das tarefas de uma rede em um conjunto de caminhos, de tal maneira que a função custo seja minimizada (Neto e Lima, 2006). Os veículos devem partir e retornar de um único depósito. Cada caminho pertencente a uma rede corresponde à programação de um veículo, de acordo com a função objetivo. Uma função objetivo que busque minimizar o número de caminhos equivale a minimização dos custos de capital desde que o número de veículos necessários seja igual ao número de rotas;
- Problema de Programação de Veículos com Múltiplos Depósitos (PPVMD): As tarefas podem ser executadas por cada veículo a partir de mais de um depósito existente, e ao final da atividade devem retornar ao depósito de partida. Este tipo de problema é mais desafiador e sofisticado do que o problema de programação de veículos com um único depósito (Ho et al., 2008);
- Problema de Programação de Veículos com Restrições de Comprimento de Rota (PPVRDV): Neste problema as restrições são ajustadas de tal forma que considerem o tempo em que o veículo pode passar longe do depósito ou a quilometragem que um determinado veículo pode cobrir sem retornar ao depósito (Bodin et.al, 1983). Na prática representam um modelo em que é necessário realizar o reabastecimento do veículo na base ou a manutenção do mesmo;
- Problema de Programação de Veículos com Múltiplos Tipos de Veículos (PPVMV): Considera a possibilidade de que veículos possuem capacidades diferentes podem ter custos fixos e variáveis diferentes (Hassold e Ceder, 2014).

Problemas Combinados de Roteirização e Programação

- Problema de roteirização e programação de ônibus escolares para o atendimento de um conjunto de escolas: Consiste de um número de escolas em que cada uma delas possuem um conjunto de paradas de ônibus com um dado número de estudantes vinculados e uma janela de tempo correspondente aos horários de início e término do período escolar. O principal objetivo deste problema é minimizar os custos de transportes para os municípios;
- Problema de roteirização e programação de serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas: Semelhante ao problema do carteiro chinês, porém possui restrições associadas à capacidade dos veículos, duração máxima da jornada e das janelas de tempo relacionada aos horários de proibição de estacionamento. Na maioria dos casos o objetivo consiste na minimização da frota ou em um objetivo correlato, como por exemplo, na minimização do tempo de espera total, para uma determinada frota;
- Problema de roteirização e programação de aeronaves: Consiste em programar simultaneamente rotas aéreas, com determinação de tabelas de horários e alocação de aeronaves, levando em consideração a demanda presente entre as respectivas cidades, frequência de vôos, voos diretos *versus* escala, entre outros. Este problema envolve o transporte de pessoas, cargas e encomendas.

O Quadro 4 apresenta as características dos principais tipos de problemas de roteirização.

Quadro 4 — Principais tipos de Problemas de Roteirização de Veículos

Denominação	Número de Roteiros	Localização dos Clientes	Limite de Capacidade nos Veículos	Número de Bases	Demandas
Problema do Caixeiro Viajante	Um	Nós	Não	Uma	Determinísticas
Problema do Caixeiro Chinês	Um	Arcos	Não	Uma	Determinísticas
Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes	Múltiplos	Nós	Não	Uma	Determinísticas
Problema de Roteirização em nós com uma única Base	Múltiplos	Nós	Sim	Uma	Determinísticas
Problema de roteirização em nós com múltiplas bases	Múltiplos	Nós	Sim	Múltiplas	Determinísticas
Problema de Roteirização em nós com demandas incertas	Múltiplos	Nós	Sim	Uma	Estocásticas
Problema de Roteirização em arcos com limite de capacidade	Múltiplos	Arcos	Sim	Uma	Determinísticas

Fonte: Adaptado BODIN et al. (1983)

2.3.3 Formulação Matemática do PCV

Para o PCV existem diversas formulações matemáticas. No presente trabalho será utilizada a formulação de Miller, Tucker e Zemlin (1960), onde os mesmos descrevem a seguinte formulação linear inteira para o PCV.

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

Sujeito à:

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

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

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad (1 \leq i \neq j \leq n) \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i, j \quad (6)$$

A função objetivo do problema (1) representa a distância total percorrida a ser minimizado, essa função representa o resultado da soma do produto entre a matriz da distância $D_{i,j}$ e a variável de decisão $X_{i,j}$. A restrição (2) garantem que cada elemento i será designado para algum vértice j e a restrição (3) garantem que o fluxo de saída de cada cidade j deve ser i . A restrição indicadas por (4) impõe que a solução não contém vários ciclos disjuntos que cobrem todos os vértices em vez de um único ciclo, onde u é uma variável auxiliar. Por fim, as restrições (5) e (6) definem os tipos de variáveis consideradas no problema.

2.3.3.1 Descrição da restrição de eliminação de sub ciclos

A restrição de eliminação de sub ciclos propostas por MTZ e definida pela equação 7.

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad (1 \leq i \neq j \leq n) \quad (7)$$

Nesta formulação u_i e u_j são variáveis inteiras que definem a ordem de visita dos vértices em um ciclo completo. $x_{i,j}$ é uma variável binária e é igual a 1 quando os nós de i, j são visitados. A restrição atua com base na rotulagem do nó. Isso significa que cada nó recebe um número rótulo, e esses números devem ser sequenciais.

2.3.4 Complexidade do problema

A complexidade computacional pode ser definida como o comportamento de algoritmos para sua resolução fundamenta-se no número de operações necessárias para obter a solução de um determinado problema. Se para um problema existe um algoritmo polinomial para sua solução, o problema é considerado “tratável” ou de classe P(Polinomial). Por outro lado, certos problemas só podem ser resolvidos em tempos exponenciais e são ditos como “intratáveis” ou NP-completos (BODIN et al., 1983).

De acordo com Ganhoto (2004), a maior parte dos problemas de decisão

associados a problemas de interesse prático, derivados ou não de problemas de otimização, pertencem as seguintes classes:

- Classe P: Um dado problema pertence a classe P, se ele pode ser solucionado por um algoritmo com complexidade de tempo polinomial;
- Classe NP: Um determinado problema pertence à classe NP, se ele pode ser verificado em tempo polinomial;
- Classe NP-completo: Um problema V pertence à classe NP completo se ele for pertencente à classe NP e se qualquer outro problema Y também pertencente à classe NP puder ser reduzido polinomialmente a V. Se V ou Y puder ser resolvido em tempo polinomial então todo problema NP-completo terá solução em tempo polinomial.
- Classe NP-Difícil: Um problema X pertence à classe NP-difícil se todos os problemas da classe NP são polinomialmente redutíveis a X. Um problema é NP-Difícil se for pelo menos tão difícil quanto qualquer problema em NP.

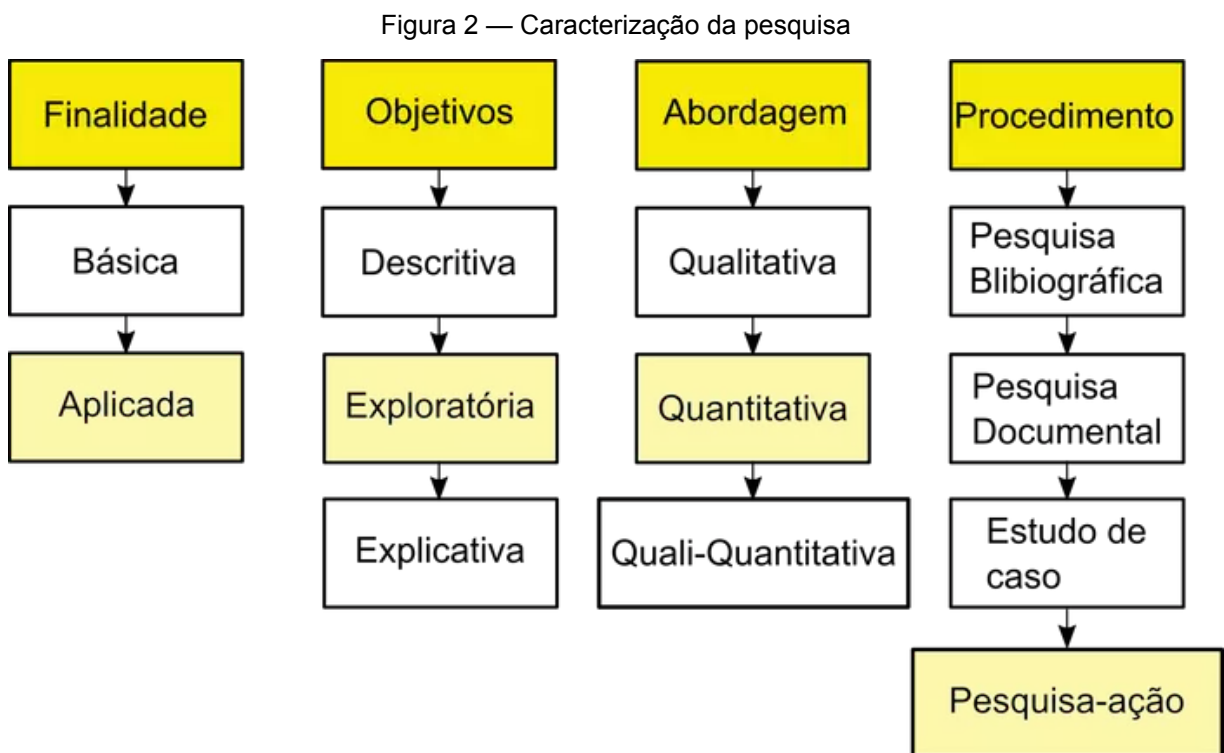
Segundo Cunha (2000), problemas que envolvem a roteirização de veículos, incluindo o caso do caixeiro viajante, correspondem a problemas combinatórios, pertencente à classe conhecida como NP-difícil, o que significa que possuem ordem de complexidade exponencial.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo visa descrever o procedimento metodológico empregado na pesquisa, a fim de facilitar o entendimento do desenvolvimento da mesma. Para este propósito será inicialmente apresentada a caracterização da pesquisa quanto à sua finalidade, objetivos, abordagem e procedimentos. Seguidamente, serão detalhadas as etapas realizadas para a realização do estudo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa pode ser classificada conforme a sua finalidade, objetivos, abordagem e seus procedimentos, de acordo com o diagrama exposto na figura 2:



Fonte: O autor (2021)

Em relação à finalidade, a pesquisa pode ser classificada como básica ou aplicada. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Dessa forma, o presente trabalho possui a finalidade aplicada, em razão de propor uma estratégia de rotas referente ao transporte fretado de funcionários em uma empresa situada na cidade Caçador/SC.

Os objetivos são divididos em três tipos de classificação: explicativa,

descritiva e exploratória. De acordo com Boaventura (2004), a pesquisa exploratória visa proporcionar maior familiaridade com o problema, com o intuito de torná-lo mais explícito ou a levantar hipóteses. Assim sendo, o presente estudo se classifica como exploratório, pois se fez necessário realizar o levantamento bibliográfico para a realização do estudo, e conversar com gestores da área de rotas para levantamento de dados.

Em relação a abordagem, a pesquisa pode ser classificada em quantitativa, qualitativa ou combinada. De acordo com Prodanov e Freitas (2013) a pesquisa quantitativa significa traduzir número em opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Levando em conta que para a resolução dos problemas utilizou-se modelos matemáticos, sendo assim capaz de quantificar os resultados desta pesquisa, dessa forma o trabalho em questão pertence a uma abordagem quantitativa.

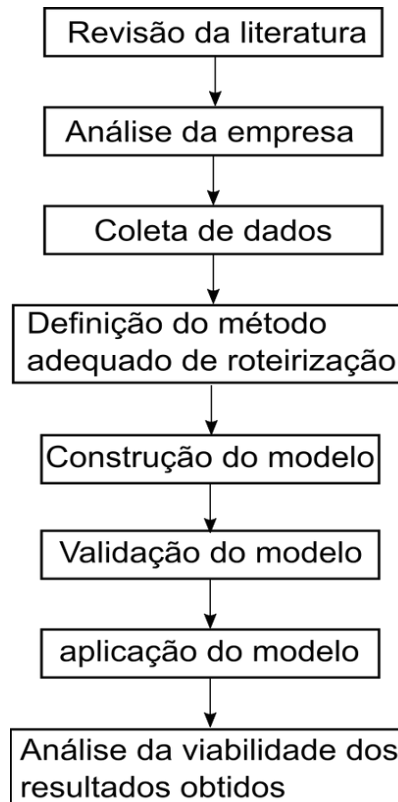
Sob perspectiva ao procedimento da pesquisa, pode ser definido como pesquisa-ação e pesquisa bibliográfica. De acordo com Gil (1991), a pesquisa bibliográfica é feita a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Para a realização do estudo fez-se necessário utilizar a pesquisa bibliográfica para levantar informações importantes para elaborar a proposta de solução para o problema de roteamento de veículos presente na empresa em questão.

Quanto a pesquisa-ação, de acordo com Thiollent (1985), a pesquisa-ação pode ser definida como um tipo de pesquisa com base empírica que é realizada em associação com uma ação ou com uma resolução de um problema coletivo em que os pesquisadores e participantes se envolvem de modo cooperativo ou participativo. Diante disso, o estudo se apresenta quanto ao seu procedimento como pesquisa-ação.

3.2 ETAPAS DA PESQUISA

A figura 3 apresenta as etapas da pesquisa.

Figura 3 — Etapas da pesquisa



Fonte: O autor (2021)

Na primeira fase foram realizadas revisões de literatura para um embasamento teórico sobre transporte fretado de passageiros e suas características. A seguir foi realizada a revisão sobre os métodos mais usuais de roteirização de veículos, contextualizando os tipos de problemas de roteirização e a classificação dos mesmos.

Em uma segunda fase verificou-se o modo como a empresa desenvolve suas atividades de distribuição de rotas, quais os tipos de veículos utilizados, quais os princípios utilizados para definir as rotas a serem seguidas. Apenas após apurar tais informações é que se torna possível entender as atividades desenvolvidas no planejamento das rotas e apresentar possíveis melhorias.

Em paralelo com a segunda fase ocorreu a terceira fase, onde realizou-se a coleta dos dados buscando identificar o plano atual de rotas e as possíveis restrições presentes no problema. Esta análise evidencia porque determinados percursos foram seguidos pela empresa e as dificuldades enfrentadas em tais rotas. Nesta etapa se examina a rota coletada, analisando ponto a ponto para se extrair o máximo de conhecimento sobre a forma utilizada para determinação da rota ideal. Esses dados foram obtidos por meio de conversas realizadas via e-mail com o supervisor de tráfego da empresa em questão, que disponibilizou o itinerário com os pontos de coleta, e com a ferramenta *google maps*, foi possível determinar a

distância entre os pontos, para a aplicação das próximas etapas do método.

Após a obtenção dos dados necessários para a realização do trabalho, realizou-se a análise dos mesmos para incluir apenas as informações relevantes, uma vez que informações em excesso podem prejudicar o processo de tomada de decisão. No estudo, foi analisada a operação da empresa e identificados quais itens devem ser levados em consideração no momento de tomada de decisão quanto à roteirização de veículos.

A auto coletivo empresa situada em Caçador - SC, está no ramo de transporte de passageiros há mais de 50 anos. O planejamento de itinerários é administrado pelo departamento de tráfego, nele os roteiros são planejados e readequados conforme as necessidades diárias do cliente, para a posterior disponibilização às empresas e colaboradores.

Dessa forma, com os dados obtidos e analisados, é possível determinar todas as variáveis do problema, e então dar sequência a quarta fase, encontrar o método adequado para solucionar o problema de roteirização. É nesta fase que deverá ser utilizado todo o conhecimento teórico adquirido na primeira fase sobre pesquisa operacional para a formulação de um modelo que utilize dados quantitativos para gerar rotas ótimas. O modelo do caixeiro viajante mostrou-se apropriado para solucionar o problema de roteirização em questão.

Numa quinta etapa, o modelo de programação é construído e ajustado para determinar a rota ideal, o objetivo é encontrar uma solução para a formulação matemática. E a seguir é realizada a validação do modelo proposto à otimização da rota da empresa auto coletivo. Para a validação deste estudo foi escolhido o software GAMS IDE versão 36.1.0, da GAMS *Development Corporation* como instrumento a ser empregado. A rota utilizada é um trajeto específico da empresa, onde a mesma consiste na saída do veículos da base passa pelos pontos é efetua a coleta dos empregados de uma mesma empresa e os entrega no destino, e por fim retorna a base.

Em seguida, é executada a aplicação do modelo com o objetivo de obter resultados viáveis para resolução dos problemas. Na última etapa do trabalho, são discutidos e analisados os resultados a partir da saída de dados do modelo proposto para identificar os possíveis problemas operacionais que possam impedir ou retardar a realização da rota proposta, sendo realizado então a averiguação da viabilidade de implantação. por fim, os resultados obtidos pela aplicação do modelo com a rota proposta devem ser comparados com a rota atual.

4 RESULTADOS

Nesta seção será abordada a descrição da empresa em estudo. Em seguida são apresentados os dados coletados na Auto Coletivo, fundamentais para execução deste trabalho. Posteriormente, são descritos os métodos utilizados para que o modelo matemático possa ser verificado e validado. Por fim, são abordados os resultados obtidos com a aplicação do modelo matemático proposto e comparados com o atual plano de rotas da empresa.

4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa Auto Coletivo Caçador Ltda foi fundada em 1970 por Ernesto Forrara e Amilton Pires. Ela opera no segmento de transporte de passageiros há 51 anos. Sua instalação está localizada na cidade de Caçador, em Santa Catarina. A Auto Coletivo dispõe de uma frota própria composta por 81 veículos entre ônibus, vans, e automóveis de pequeno porte.

Atualmente, a empresa atende o município de Caçador/SC, na área urbana, como também presta serviços de transporte aos estudantes das áreas rurais. E há 5 anos a Auto Coletivo ampliou seu leque de atendimento, com abertura da Casa do Ônibus, na rodovia Engenheiro Lourenço Faoro, atendendo toda região no segmento de manutenção para ônibus e caminhões, assim como realizando a manutenção constante da própria frota.

O principal serviço ofertado pela empresa é o fretamento de passageiros, que é um transporte personalizado e dedicado ao transporte de colaboradores. Este tipo de transporte é utilizado por diversos setores como: Escolas, universidades, indústrias, entre outras pelo motivo de ser um serviço personalizado e moldado às necessidades dos clientes. O serviço é realizado após contrato firmado entre as duas partes, neste contrato deve ser determinado antecipadamente o horário das viagens, o número de viagens, os itinerários das linhas, os horários de partidas e chegadas dos ônibus e, conseqüentemente, os valores acertados na negociação realizada. Este serviço é oferecido aos colaboradores das empresas contratantes como garantia de segurança e conforto durante o trajeto de suas casas ao trabalho, deste modo poupando esses colaboradores de um desgaste no trajeto.

Para satisfazer o cliente, a empresa define as rotas conforme as necessidades diárias dos clientes alcançando excelência em serviços. Baseados nos endereços das residências de seus funcionários, são traçados itinerários, buscando sempre a maximização da ocupação dos veículos, somando conforto e economia de tempo. Como benefício direto, aos clientes da Auto Coletivo, obtém

conforto e comodidade, fatores que impactam diretamente na produtividade de seus funcionários, além de minimizar os riscos de atrasos e faltas.

A rota estudada nesta pesquisa é o trajeto da garagem da Auto Coletivo com sentido a Madeireira Seleme, empresa contratante do serviço, e ao fim retorna a garagem, o veículo utilizado para realizar o trajeto é um ônibus.

4.2 COLETA DE DADOS

Nesta seção, são apresentados os dados coletados juntos à Empresa Auto Coletivo e utilizados como dados dos parâmetros de entrada no modelo implementado em linguagem MIP.

4.2.1 Pontos de Coleta

Para a realização deste trabalho foi necessária a disponibilização dos dados pela empresa Auto Coletivo. A mesma forneceu os pontos de coleta contendo todas as informações necessárias para aplicação do modelo, com esses dados foi possível conhecer a quantidade de nós presentes no trajeto.

Inicialmente foi disponibilizada uma planilha contendo a quantidade de pontos de coleta, a descrição da localização dos pontos, o período de realização do trajeto e os horários definidos de início e fim do trajeto. A planilha está disponível no quadro 5.

Quadro 5 — Itinerário da rota madeireira Seleme

ITINERÁRIO	SELEME	SEE - 13:00
PERÍODO	SEGUNDA À SEXTA	
CARRO	6	
Nº	PONTOS	HORÁRIO
0	GARAGEM AUTO COLETIVO	13:05
1	MUTIRÃO MERCADO JJ	
2	OFICINA DE CHAPEAÇÃO NA RUA ALBINO POTRICK	
3	PORTÃO CAIC 1	
4	PORTÃO CAIC 2	
5	PANIFICADORA SANTELMO JUNG	
6	PONTO ATRÁS DA CORFIO	
7	MADEIREIRA SELEME	13:25

Fonte: O autor (2021)

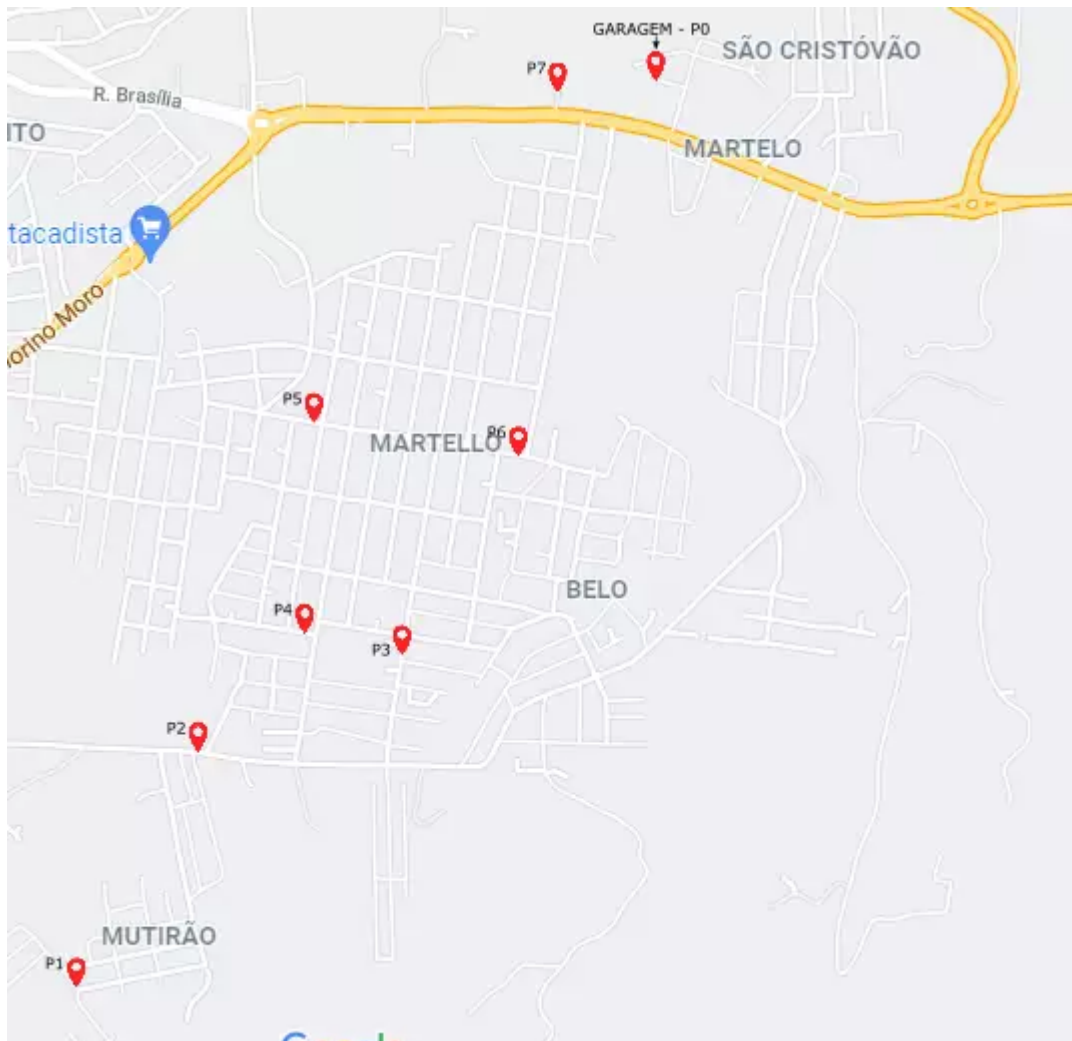
Com a intenção de conhecer a rota problema do trabalho, foram feitas visitas na empresa estudada. Durante as visitas, foram levantados dados importantes da empresa como as regiões de distribuição que a empresa atua, os endereços dos pontos, o número de veículos disponíveis da empresa e o atual plano de roteirização e como ele é feito.

Após a coleta dos endereços dos pontos, estes foram aplicados no *Google Maps*, ferramenta capaz de medir a distância, em quilômetros, entre dois pontos em um mapa, além de conseguir localizar endereços com precisão. Esta aplicação teve a finalidade de obter uma visualização mais precisa do trajeto estudado. Para facilitar a identificação dos pontos na matriz, os pontos de coleta são representados da seguinte maneira:

- P0: Garagem Auto Coletivo Caçador;
- P1: Mutirão Mercado JJ;
- P2: Esquina Oficina Chapeação na Rua Albino Potrick;
- P3: Portão Caic 1;
- P4: Portão Caic 2;
- P5: Panificadora Santelmo Jung;
- P6: Ponto atrás da Corfio;
- P7: Madeireira Seleme.

É possível observar os pontos de coleta e a garagem da empresa na figura 4.

Figura 4 — Pontos de coleta



Fonte: O autor (2021)

4.2.2 Matriz de distâncias

Para a implementação do modelo foi necessária a criação de uma matriz de distâncias entre a garagem e todos os pontos a serem visitados.

A tabela 3 apresenta as distâncias aproximadas, calculadas com o auxílio do *Google Maps*, em quilômetros (Km) entre a garagem e os pontos de coleta e as distâncias de ponto a ponto.

Tabela 3 — Matriz distâncias em quilômetro

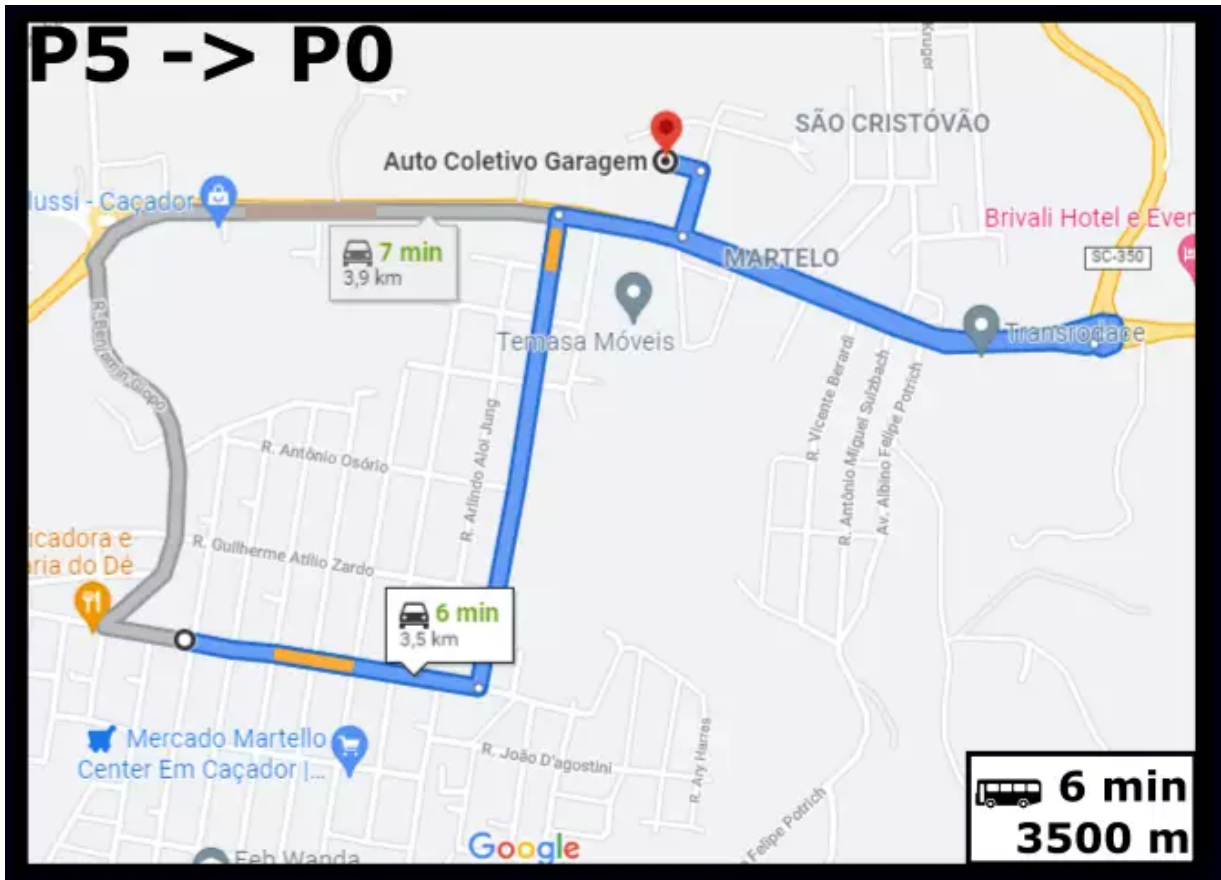
ORIGEM / DESTINO		P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
		AUTO COLETIVO GARAGEM	MUTIRÃO MERCADO JJ	ESQ. OFICINA CHAPEAÇÃO NA RUA ALBINO POTRICK	PORTÃO O CAIC 1	PORTÃO CAIC 2	PANIFICADORA SANTELMO JUNG	PONTO ATRÁS DA CORFIO	MADEIREIRA SELEME
P0	AUTO COLETIVO GARAGEM	999	3,85	2,85	2,05	2,35	1,85	1,3	0,55
P1	MUTIRÃO MERCADO JJ	5	999	0,95	1,8	1,6	2,1	2,5	3,53
P2	ESQ. OFICINA CHAPEAÇÃO NA RUA ALBINO POTRICK	4	0,95	999	0,8	0,65	1,1	1,5	2,53
P3	PORTÃO CAIC 1	3,7	1,8	0,8	999	0,35	0,85	0,75	1,73
P4	PORTÃO CAIC 2	4	1,6	0,65	0,35	999	0,7	1	2,03
P5	PANIFICADORA SANTELMO JUNG	3,5	2,1	1,1	0,85	0,7	999	0,5	1,53
P6	PONTO ATRÁS DA CORFIO	3	2,5	1,5	0,75	1	0,5	999	0,98
P7	MADEIREIRA SELEME	3,8	4,3	3,5	3,3	2,8	2,2	2,6	999

Fonte: O autor (2021)

Com o intuito de buscar a solução do problema, nas células em que os pontos de origem e destinos são os mesmos, assume-se um valor significativamente alto, para que assim esses caminhos não sejam considerados na execução do modelo.

A dinâmica utilizada para preenchimento da matriz está evidenciada na figura 5, onde mostra um exemplo que expressa a forma com que os pontos são adicionados ao *Google Maps*, que retorna o trajeto mais curto em quilômetros (Km) e o tempo necessário para percorrer tais pontos. A figura 5 aponta a distância do Ponto 5 (Panificadora Santelmo Jung) ao Ponto 0 (Garagem Auto Coletivo) de 3,5 Km e o tempo de trajeto de 6 minutos aproximados.

Figura 5 — Distância do P5 para o P0 no Google Maps



Fonte: O autor (2021)

4.2.3 Plano atual de rotas

A empresa atual em estudo não conta com nenhuma técnica de roteirização, a distribuição das rotas são baseadas apenas nas experiências dos motoristas e gestores da organização.

A rota é realizada semanalmente por um único veículo durante os dias: Segunda-Feira, Terça-Feira, Quarta-Feira, Quinta-Feira, e Sexta-Feira, onde são visitados 7 pontos de coleta.

O percurso total é de aproximadamente 11,93 km contando com o retorno ao ponto de origem e que todos os pontos sejam atendidos. Os dados estão representados na tabela 4.

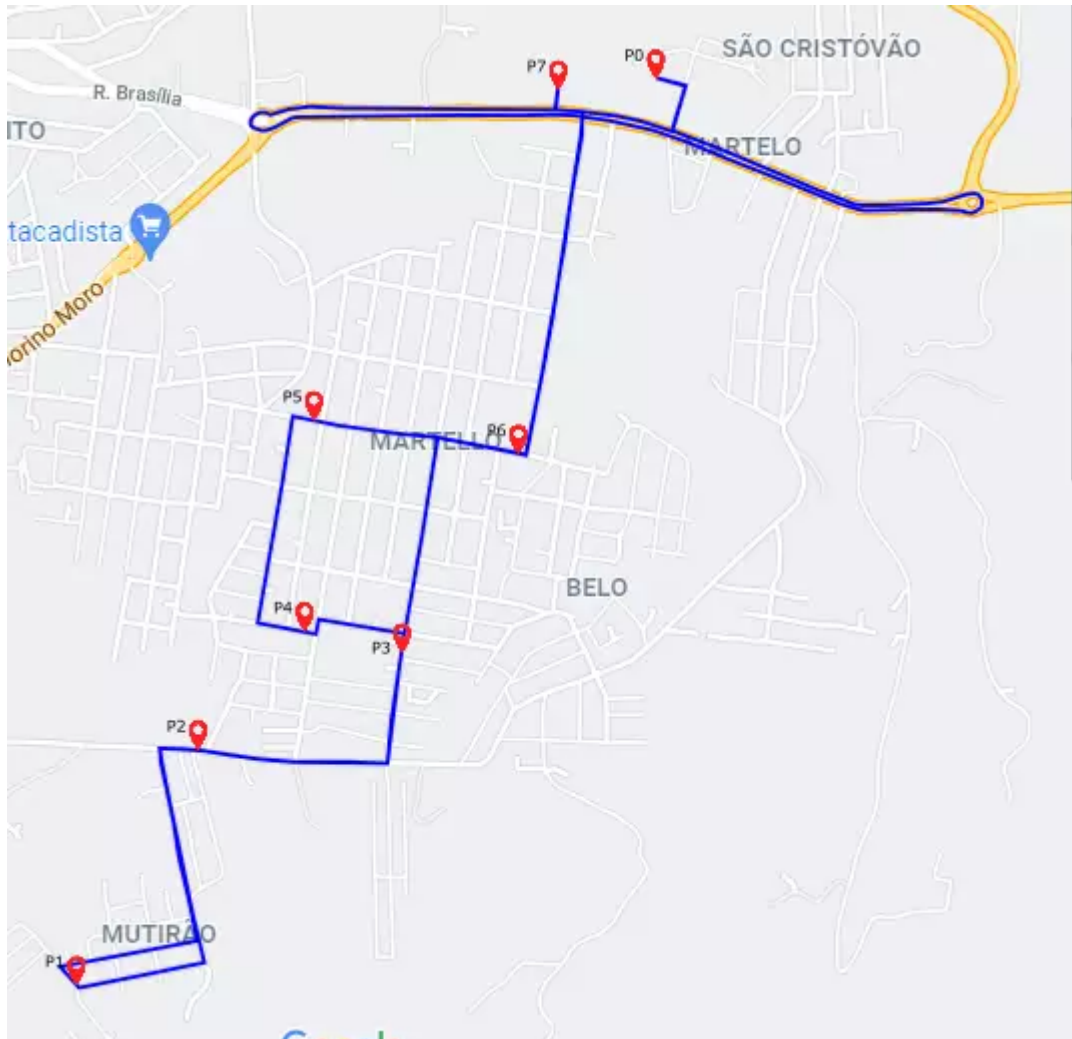
Tabela 4 — Plano atual de rotas

ROTA ATUAL		
ORIGEM	DESTINO	DISTÂNCIA (Km)
Auto Coletivo Garagem	Mutirão mercado JJ	3,85
Mutirão mercado JJ	Esq. Ofinica Chapeação na Rua Albino Potrick	0,95
Esq. Ofinica Chapeação na Rua Albino Potrick	Portão Caic 1	0,8
Portão Caic 1	Portão Caic 2	0,35
Portão Caic 2	Panificadora Santelmo Jung	0,7
Panificadora Santelmo Jung	Ponto Atrás da Corfio	0,5
Ponto Atrás da Corfio	Madeiraira Seleme	0,98
Madeiraira Seleme	Auto Coletivo Garagem	3,8
TOTAL		11,93

Fonte: O autor (2021)

Para melhor entendimento do plano de rotas atual, a figura 6 é inserida, Ela demonstra com o auxílio do *google maps* a dinâmica realizada pelo veículo para percorrer a rota atual atendendo todos os pontos demandados.

Figura 6 — Rota atual representada com auxílio de Google Maps



Fonte: O autor (2021)

A rota atual é composta pela seguinte sequência de pontos P0 - P1 - P2 - P3 - P4 - P5 - P6 - P7 - P0.

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA PROPOSTA

Neste tópico, é apresentada a definição do modelo de programação linear adequado. Posteriormente, são descritas as variáveis utilizadas juntamente com as restrições que limitam o problema, para que assim o modelo matemático possa ser verificado. Em seguida o modelo é validado e aplicado com os dados obtidos na coleta. Por fim é realizada a análise da viabilidade dos resultados obtidos e elaborada a comparação do sequenciamento entre as rota proposta e a rota atual.

4.3.1 Definição do modelo de programação linear adequado

Para a definição do modelo de programação linear adequado, deve ser considerado o tipo de situação em que o problema a ser resolvido se enquadra. Para o caso em questão, devemos obter resultados otimizados no qual todos os pontos com demanda sejam atendidos e só retornem à origem após percorrer todos os pontos de coleta, outro fator que deve ser levado em consideração no desenvolvimento do modelo matemático é que não pode haver subciclos, ou seja, duas rotas distintas ambas com origem e destinos diferentes.

Diante do exposto, conseguimos identificar que o modelo que se enquadra na resolução da problemática abordada é o modelo do caixeiro viajante, que faz parte da programação linear.

4.3.2 Construção do Modelo matemático

Para que a construção do modelo se torne viável, é importante definir os parâmetros que o compõem. São eles:

- I : Conjunto de pontos de coleta a serem atendidos e a garagem da empresa $\{i_0, i_1, \dots, i_N\}$;
- O_i : Subconjunto contendo somente a origem i_0 ;
- SO_i : Subconjunto contendo todos os pontos menos a origem;
- $D_{i,j}$: Distância entre o ponto i e o ponto j ;

4.3.3 Variáveis do problema

O problema apresenta uma variável de decisão e uma auxiliar. A variável de decisão x e do tipo binária depende de dois índices: i, j . Esta variável é responsável pela definição dos trajetos a serem percorridos. Desta forma, a variável de decisão se apresenta da seguinte maneira:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o caminho } i \text{ até } j \text{ é percorrido;} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Além da variável de decisão, o problema conta com uma variável auxiliar,

denominada com u_i , que é utilizada para evitar que subciclos sejam formados.

4.3.4 Restrições

A classe das restrições são definidas como os limites que a solução do problema deve respeitar, para que o modelo matemático possa se converter em uma solução viável. As restrições serão explicadas a seguir conforme as equações citadas no referencial teórico deste trabalho.

4.3.4.1 Restrições de visita

A primeira classe de restrições diz respeito à quantidade de vezes que cada ponto de coleta deve ser visitado, desta forma evita-se que os pontos sejam visitados mais de uma vez por um veículo.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

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

A equação 9 tem como objetivo assegurar que uma única origem i visite o destino j . Enquanto a equação 10 tem por objetivo assegurar que um único destino j tenha sua origem em i . garantindo assim que cada ponto de coleta seja visitado exatamente uma vez.

4.3.4.2 Restrição de sub ciclos

A restrição de subciclos é inserida no problema para garantir a não existência de ciclos pré-hamiltonianos. garantindo assim que a solução do problema se apresente somente em uma rota, com início e fim na garagem da empresa.

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad i = 2, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (11)$$

Sem a equação 11, é possível que o veículo conclua o trajeto em um ponto de coleta, invalidando o resultado, uma vez que ao final da rota o veículo deve retornar a empresa.

4.3.4.3 Integralidade das variáveis

Ao final, o modelo matemático necessita de restrições que tratem do tipo de variável de decisão e auxiliar a ser escolhida.

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i, j \quad (13)$$

A equação 12, determinam que as variáveis sejam binárias, atribuindo valores binários 0 e 1, respectivamente. A equação 13, garantem a não negatividade, permitindo valores inteiros à variável auxiliar U_j .

4.3.5 Função Objetivo

A equação 14, é responsável por determinar o objetivo do modelo matemático. No problema proposto, essa equação busca garantir que a distância percorrida em toda a rota seja a menor possível.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (14)$$

A equação 14 realiza a função de somar produto entre o parâmetro $D_{i,j}$ com a variável de decisão $x_{i,j}$.

4.3.6 Modelo Matemático completo

Para a estruturação do modelo de programação linear, foi necessário utilizar as restrições e os conceitos abordados no item interior. O modelo matemático para o problema de roteirização é formulado por:

Minimizar:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (15)$$

Sujeito à:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad i = 2, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (19)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i, j \quad (20)$$

4.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

Devido a complexidade da resolução do modelo matemático, surgiu a necessidade de encontrar ferramentas que auxiliem na busca pela solução do problema em estudo. Em razão da facilidade de utilização e conhecimento do sistema, optou-se pela utilização do *software* GAMS IDE, versão 36.1.0 como instrumento a ser empregado a fim de validar o modelo apresentado.

A utilização do *software* GAMS IDE, como ferramenta para encontrar a solução, exigiu que o modelo matemático fosse implementado no *software*. Assim um arquivo .gms foi gerado contendo o modelo matemático completo presente no item 4.3.6. O modelo matemático implementado no GAMS é apresentado na figura 7.

Figura 7 — Modelo de programação no GAMS

```

sets i conjunto dos pontos de origem i /i0, i1, i2, i3, i4, i5, i6, i7/
     o(i) subconjunto origem /i0/
     so(i) subconjunto de todos os pontos menos a origem
     alias (i, j);

so(i)$ (not o(i)) = yes;

table C(i, j) Distancia do ponto i de origem para ponto de destino j
      i0    i1    i2    i3    i4    i5    i6    i7
i0    999  3.85  2.85  2.05  2.35  1.85  1.3   999
i1     5    999  0.95  1.8   1.6   2.1   2.5   3.53
i2     4    0.95  999  0.8   0.65  1.1   1.5   2.53
i3     3.7  1.8   0.8   999  0.35  0.85  0.75  1.73
i4     4    1.6   0.65  0.35  999  0.7   1     2.03
i5     3.5  2.1   1.1   0.85  0.7   999  0.5   1.53
i6     3    2.5   1.5   0.75  1     0.5   999  0.98
i7     3.8  4.3   3.5   3.3   2.8   2.2   2.6   999 ;

variable z Distancia total
binary variable x(i, j) 1 se vai do ponto i para j ;
positive variables u(i);

equations E1, E2(i), E3(j), E4(i,j);
E1.. z=E=sum((i, j), C(i, j)*X(i, j));
E2(i).. sum(j, x(i, j)) =E= 1;
E3(j).. sum(i, x(i, j)) =E= 1;
E4(i,j)$ (so(i) and so(j)) .. u(i) - u(j) + 8 * x(i,j) =L= 8 - 1;

model tcc /all/;
solve tcc minimizing z using MIP;

display x.L, z.L, u.L;

```

Fonte: O autor (2021)

A figura 7 apresenta a concepção da programação matemática, inicialmente são definidos os parâmetros para resolução do problema, em seguida é adicionada a matriz com a entrada de dados necessários para a otimização, depois é definida a variável de decisão e seu tipo, para que posteriormente fosse inserida na função objetivo, também define-se a variável auxiliar. adiante inclui as equações que apontam a função objetivo e as demais restrições responsáveis por limitar o problema.

Com a execução do modelo, os resultados obtidos por meio do *software* GAMS IDE, foram satisfatórios. Assim, confirmando que o modelo executa corretamente cada iteração de acordo com as restrições impostas. No próximo

capítulo, é apresentada a aplicação do modelo para o problema abordado neste trabalho junto com os resultados obtidos com sua execução.

4.5 APLICAÇÃO DO MODELO

Os arquivos do modelo foram submetidos ao *software* GAMS IDE, utilizando o solver MIP. Ao solicitar a resolução do modelo, o *software* indicou que a solução ótima encontrada tem distância percorrida igual a 11.33 Km.

A matriz binária de saída do modelo referente as arestas selecionadas para formar a solução é exibida na tabela 5, assumindo o número 1 quando o ponto j é atendido imediatamente após o ponto i e 0 caso contrário.

Tabela 5 — Matriz binária de saída

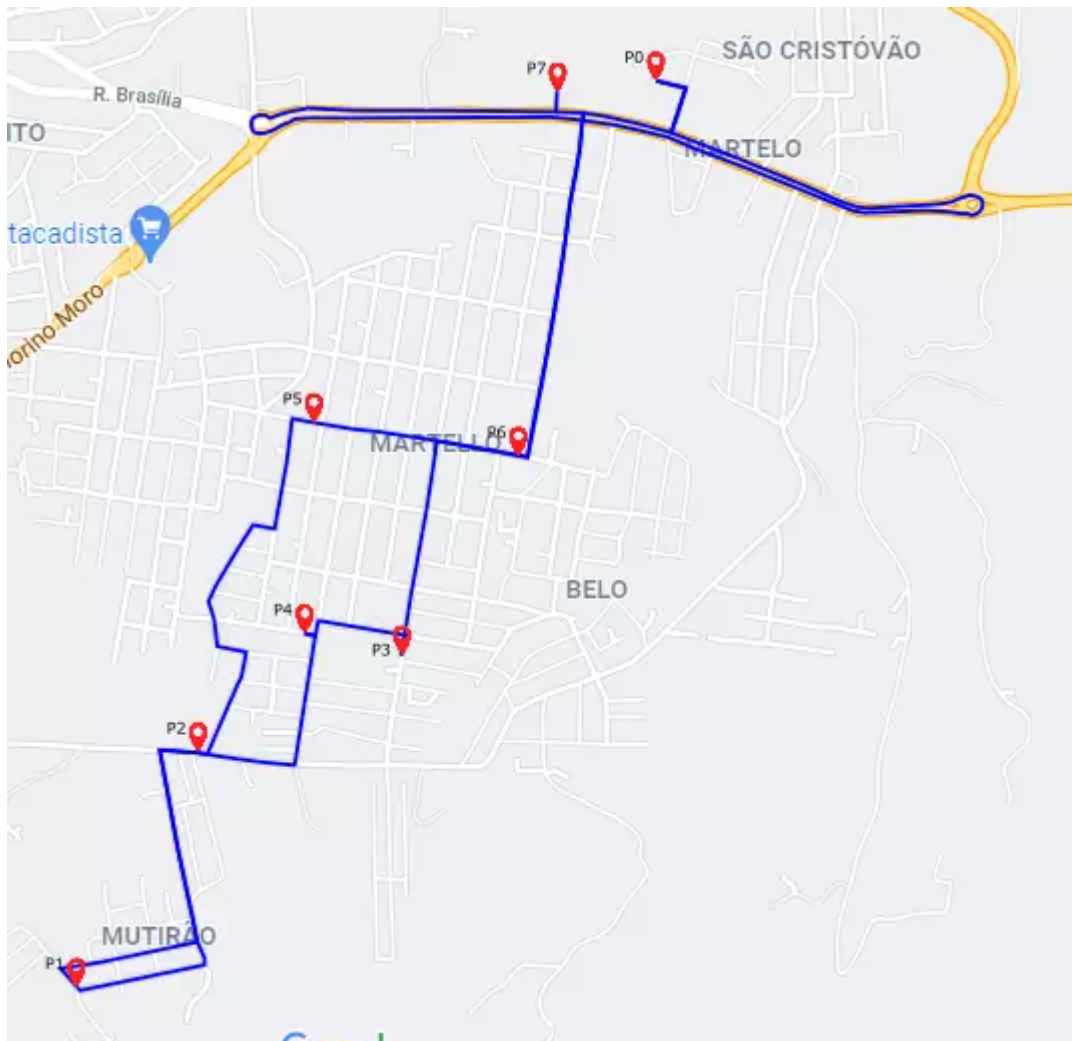
	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
P0	0	0	0	1	0	0	0	0
P1	0	0	1	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	1	0	0
P3	0	0	0	0	1	0	0	0
P4	0	1	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	0	0	1	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	1
P7	1	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: O autor (2021)

Como resultante da modelagem o circuito com a menor distância parte da garagem da auto coletivo - P0, passa pelo portão Caic 1 - P3, Portão Caic 2 - P4, Mutirão Mercado JJ - P1, Esquina oficina chapeação na rua albino potrick - P2, Panificadora Santelmo - P5, ponto atrás da Corfio - P6, Madeireira Seleme - P7, retornando à origem. A resolução se deu em 0,188 segundos.

Para facilitar a visualização e o entendimento do resultado da rota otimizada, o sequenciamento do trajeto foi representado com o auxílio do *google maps* na figura 8.

Figura 8 — Rota otimizada



Fonte: O autor (2021)

O resultado obtido satisfaz às restrições estabelecidas pelo modelo, sendo assim sua validação se tornou viável. No próximo tópico, é realizada a análise da viabilidade dos resultados obtidos por meio de um diagnóstico do trajeto a ser seguido, e por fim é elaborada a comparação do sequenciamento entre a rota proposta e a rota atual.

4.6 ANÁLISE DA VIABILIDADE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com a apresentação dos resultados obtidos pela aplicação do modelo, pode-se realizar a análise da viabilidade dos resultados. O modelo matemático gerou respostas condizentes com o esperado.

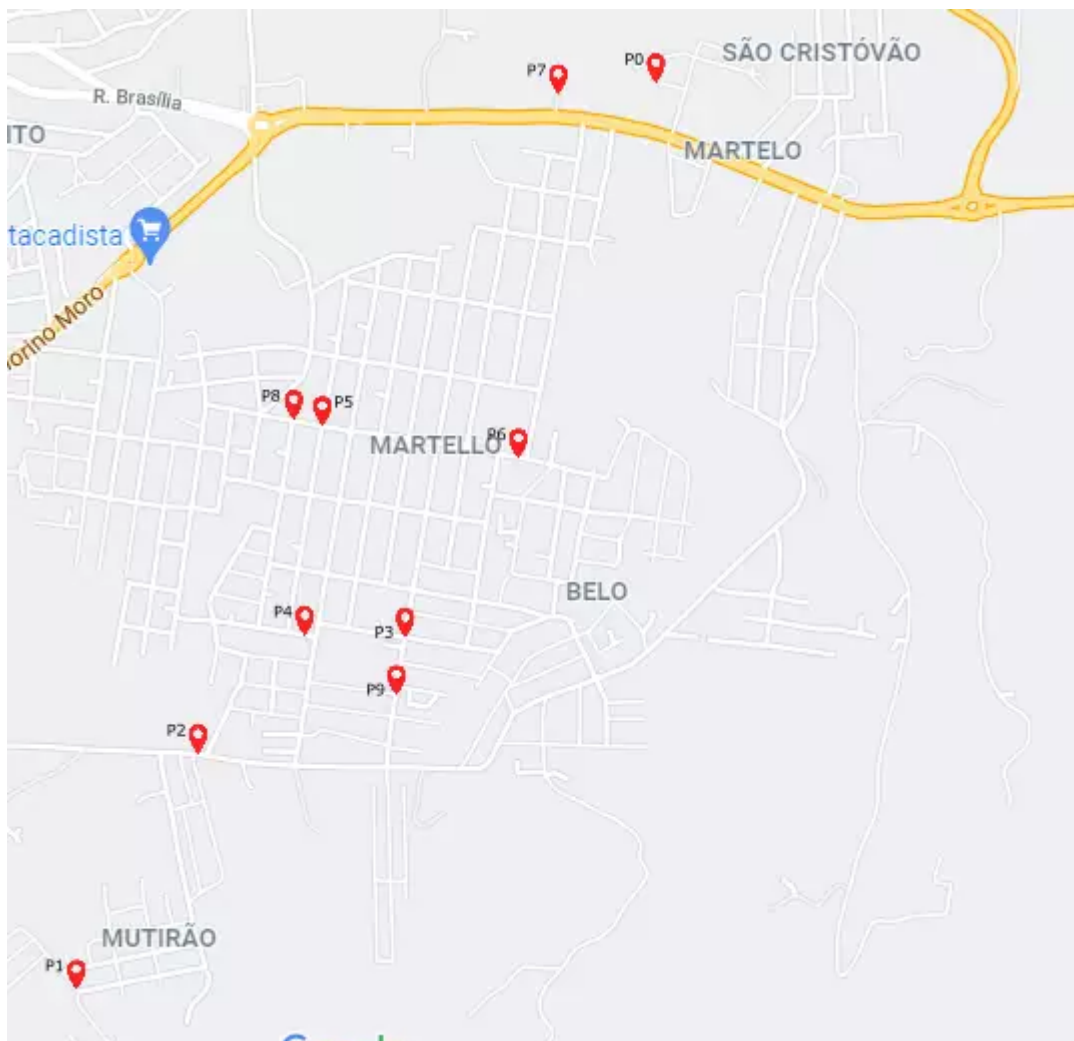
Embora o modelo matemático tenha correspondido às expectativas, a rota indicada na figura 8 alcançada como resultado da aplicação do modelo, com menor distância, é tida como não viável a sua utilização, devido ao fato de apresentar dois

cenários: do ponto 3 ao ponto 4 e do ponto 4 ao ponto 1, no qual fazem necessários que o ônibus responsável por efetuar o trajeto, realize uma manobra de retorno na via. Perante o exposto a solução encontrada é inviável visto que seria impossível realizar tal manobra sem que houvesse infração de trânsito, além de causar riscos aos trabalhadores em deslocamento.

Portanto, visando encontrar uma solução praticável, foi necessário propor modificações. Tais modificações ocorreram tanto no modelo matemático quanto nos parâmetros definidos antes da execução.

A primeira modificação necessária foi a adição de dois novos pontos são eles: P8 e P9, tais pontos foram adicionados nas esquinas em que os pontos de coleta estão presentes no meio da via, como é o caso do P5 e P3. A figura 9 demonstra a localização dos pontos P8 e P9 em uma ilustração no *google maps*.

Figura 9 — Adição de novos pontos (P8 e P9)



Fonte: O autor (2021)

A segunda modificação deu-se na modelagem matemática, onde as

restrições impostas pela equações 21 e 22, foram implementados de modo a impedir que a solução tenha caminhos em que são necessários realizar a manobra na via alterando a direção do veículo.

$$X_{5,8} + X_{8,5} = 1 \quad (21)$$

$$X_{3,9} + X_{9,3} = 1 \quad (22)$$

As equações 21 e 22, definem que obrigatoriamente o ônibus deve percorrer dois pontos em casos que tenhamos o ponto de coleta localizado no meio da rua, na equação 21 para garantir uma solução viável deve ser atribuído um valor a variável binária quando se percorre a origem do ponto 5 para o destino do ponto 8, ou origem do ponto 8 com destino ao ponto 5, assegurando a restrição . Para a equação 22, deve ser ativado um lado dos binários ou a origem no ponto 3 com destino ao ponto 9, ou a origem em 9 com destino ao ponto 3. Impedindo assim que o ônibus realize a manobra de retorno na via. O modelo matemático com as modificações implementadas no GAMS IDE pode ser visualizado na figura 10.

Figura 10 — Modelo matemático implementado no GAMS

```

sets i conjunto dos pontos de origem i /i0, i1, i2, i3, i4, i5, i6, i7, i8, i9/
     o(i) subconjunto origem /i0/
     so(i) subconjunto de todos os pontos menos a origem
     alias (i, j);

so(i)$ (not o(i)) = yes;

table D(i, j) Distancia do ponto i de origem para ponto de destino j
      i0  i1  i2  i3  i4  i5  i6  i7  i8  i9
i0  999  3.85  2.85  2.05  2.35  1.85  1.3  999  999  2.1
i1  5    999  0.95  1.8  1.6  2.1  2.5  3.53  2    1.7
i2  4    0.95  999  0.8  0.65  1.1  1.5  2.53  1.1  0.7
i3  3.7  1.8  0.8  999  0.35  0.85  0.75  1.73  0.9  0.15
i4  4    1.6  0.65  0.35  999  0.7  1    2.03  0.65  0.45
i5  3.5  2.1  1.1  0.85  0.7  999  0.5  1.53  0.075  0.95
i6  3    2.5  1.5  0.75  1    0.5  999  0.98  0.6  0.85
i7  3.8  4.3  3.5  3.3  2.8  2.2  2.6  999  2.6  1.83
i8  3.6  2    1.1  0.9  0.65  0.075  0.6  1.7  999  1
i9  3.7  1.7  0.7  0.15  0.45  0.95  0.85  1.83  1    999;

variable z Distancia total
binary variable x(i, j) 1 se vai do ponto i para j ;
positive variables u(i);

equations E1, E2(i), E3(j), E4(i,j), E5, E6;
E1.. z=E=sum((i, j), D(i, j)*X(i, j));
E2(i).. sum(j, x(i, j)) =E= 1;
E3(j).. sum(i, x(i, j)) =E= 1;
E4(i,j)$ (so(i) and so(j)) .. u(i) - u(j) + 9 * x(i,j) =L= 9 - 1;
E5 .. x('i5', 'i8') + x('i8', 'i5') =E= 1;
E6 .. x('i3', 'i9') + x('i9', 'i3') =E= 1;

model tcc /all/;
solve tcc minimizing z using MIP;

display x.L, z.L, u.L;

```

Fonte: O autor (2021)

Os arquivos do modelo com as modificações realizadas foram submetidos ao *software* GAMS IDE, utilizando o solver MIP. Os dados da resolução do modelo são apresentados na figura 11.

Figura 11 — Dados da resolução do modelo

```

          S O L V E          S U M M A R Y

MODEL    tcc                OBJECTIVE  z
TYPE     MIP                DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER   CPLEX              FROM LINE 36

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE          11.4550

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.344 10000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    1112   2147483647
--- *** This solver runs with a demo license. No commercial use.
--- GMO setup time: 0.00s
--- GMO memory 0.52 Mb (peak 0.53 Mb)
--- Dictionary memory 0.00 Mb
--- Cplex 20.1.0.1 link memory 0.00 Mb (peak 0.01 Mb)
--- Starting Cplex

--- MIP status (101): integer optimal solution.
--- Cplex Time: 0.22sec (det. 33.65 ticks)

--- Fixing integer variables and solving final LP...

--- Fixed MIP status (1): optimal.
--- Cplex Time: 0.00sec (det. 0.18 ticks)

Proven optimal solution
MIP Solution:          11.455000      (1112 iterations, 172 nodes)
Final Solve:          11.455000      (8 iterations)

```

Fonte: O autor (2021)

Posteriormente à execução do modelo os resultados foram gerados e organizados na tabela 6 para facilitar a visualização e o entendimento da rota otimizada. A tabela 6 exhibe o sequenciamento da rota, a distância percorrida pelo ônibus de ponto a ponto e a distância total do trajeto.

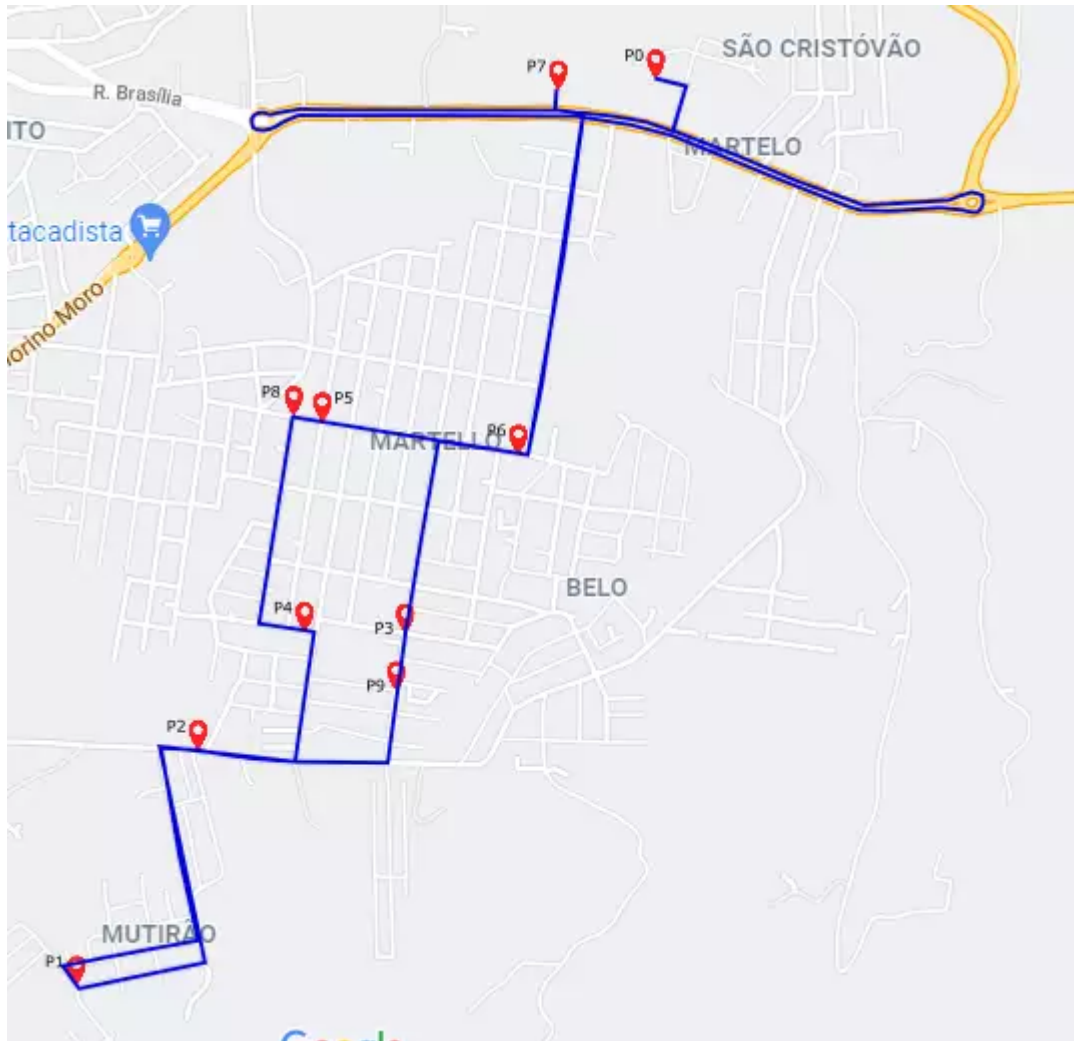
Tabela 6 — Rota ótima

ROTA ÓTIMA		
ORIGEM	DESTINO	DISTÂNCIA (Km)
Auto Coletivo Garagem	Ponto Atrás da Corfio	1,3
Ponto Atrás da Corfio	Panificadora Santelmo Jung	0,5
Panificadora Santelmo Jung	Ponto 8	0,075
Ponto 8	Portão Caic 2	0,65
Portão Caic 2	Mutirão Mercado JJ	1,6
Mutirão Mercado JJ	Esq. Oficina chapeação na Rua Albino Potrick	0,95
Esq. Oficina chapeação na Rua Albino Potrick	Ponto 9	0,7
Ponto 9	Portão Caic 1	0,15
Portão Caic 1	Madeiraira Seleme	1,73
Madeiraira Seleme	Auto Coletivo Garagem	3,8
TOTAL		11,455

Fonte: O autor (2021)

A rota resultante de acordo com o modelo proposto após as modificações é apresentada na figura 12, para fins de ilustração utilizou-se o *Google Maps* para demonstração da rota.

Figura 12 — Rota proposta após modificações



Fonte: O autor (2021)

Com a apresentação dos resultados obtidos pela execução do modelo, pode-se então realizar comparação entre o trajeto realizado pela empresa com a roteirização resultante da modelagem matemática aplicada no modelo deste estudo. A tabela 7 exibe a análise comparativa entre o plano de rotas atual e o proposto, considerando a sequência de pontos a serem atendidos e as distâncias percorridas pelo veículo.

Tabela 7 — Comparação entre a rota atual e a proposta

ROTA	SEQUÊNCIA	DISTÂNCIA (Km)
Atual	P0-P1-P2-P3-P4-P5-P6-P7-P0	11,93
Proposta	P0-P6-P5-P4-P1-P2-P3-P7-P0	11,455

Fonte: O autor (2021)

Conforme exposto nas comparações das sequências na tabela 7, a roteirização da empresa apresenta uma sequência que totaliza 11,93 Km, enquanto a sequência determinada pelo modelo matemático deste trabalho sugere um sequenciamento para o veículo que resultará um trajeto de aproximadamente 11,455 Km. Isso equivale a uma otimização aproximada de 4%, em relação a rota utilizada pela empresa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo propôs um modelo matemático para o procedimento de roteirização do serviço de transporte fretado de colaboradores na empresa Auto Coletivo Caçador, capaz de determinar a rota mais eficiente a serem implementados pela empresa, de modo a reduzir a distância percorrida pelo veículo durante o trajeto, respeitando as restrições estabelecidas no modelo.

Para tanto, foi-se necessário realizar uma revisão bibliográfica de assuntos relacionados a transporte fretado de pessoas e pesquisa operacional. Com o auxílio do supervisor de tráfego da empresa Auto Coletivo, foram coletados os dados necessários para o desenvolvimento do modelo, no processo de roteirização da empresa identificou-se que a mesma não possui nenhum modelo de roteirização, onde a mesma é feita de forma manual com base nos conhecimentos e experiência do colaborador responsável.

Em seguida, formulou-se um modelo de programação linear, utilizando como base o modelo do caixeiro-viajante, cuja resolução é semelhante ao problema em questão. É importante ressaltar, a utilização das restrições 20 e 21 para tratar as particularidades do problema.

Para a solução do modelo matemático utilizou-se o *software* GAMS IDE como ferramenta de suporte para a estratégia de solução, viabilizando a execução do modelo matemático.

O resultado obtido foi comparado com o atual cenário utilizado pela empresa. Com base na rota atual da empresa, o veículo percorre 11,93 quilômetros para cumprir a rota completa. Considerando a aplicação do novo plano de rota na empresa, ao invés de percorrer 11,93 quilômetros, o veículo passaria a percorrer apenas 11,455 quilômetros. Em termos percentuais esse valor representa uma redução de 4% da distância empreendida para realizar a rota.

Com estes resultados se conclui que o modelo matemático desenvolvido, embora necessite de maior pesquisa, se apresenta suficiente e com bons resultados na resolução dos problemas de roteirização.

Para trabalhos futuros, são propostas as seguintes sugestões:

- Elaboração de planos de roteirização referente às outras rotas realizadas pela empresa, que não foram abordadas nesta pesquisa.
- Adaptar o modelo matemático de forma que seja capaz de resolver problemas com mais vértices que o aqui apresentado.

REFERÊNCIAS

- ALVIM, Bernardo Guatimosim. **Análise estatística dos fatores sócio-econômicos e de mobilidade que atuam sobre a demanda por serviços de ônibus fretado no estado de São Paulo**. São Paulo, 1995 Dissertação - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ASSAD, Arjang A; PEARN, Wen-Lea; GOLDEN, Bruce L. The Capacitated Chinese Postman Problem: Lower Bounds and Solvable Cases. **American Journal of Mathematical and Management Sciences**, v. 7, p. 63-88, 1987.
- BAKER, Barrie M.; AYECHIEW, M.A. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 30, p. 787-800, abr 2003.
- BOAVENTURA, Edivaldo M.. **Metodologia da pesquisa**: monografia, dissertação, tese. Atlas, f. 80, 2004. 160 p.
- BODIN, Lawrence *et al.* Routing and scheduling of vehicles and crews: : The state of the art. **Computers & Operations Research**, v. 10, p. 63-211, 1983.
- BRASIL. Lei nº 12.587/12. Revista. Política Nacional da Mobilidade Urbano, Brasília, 03 de janeiro de 2012. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSEMOB/cartilha_lei_12587.pdf. Acesso em: 27 mai. 2021.
- CAMPELO, Pedro *et al.* Consistent vehicle routing problem with service level agreements:: a case study in the pharmaceutical distribution sector. **European Journal of Operational Research**, v. 273, p. 131-145, 16 Fev 2019.
- CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PASSAGEIROS EM REGIME DE FRETAMENTO. **Transporte & Desenvolvimento**, Brasília , 03 mar 2017. Disponível em: <https://cnt.org.br/transporte-rodoviario-passageiros-regime-fretamento>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- CORDEAU, Jean-François *et al.* Chapter 6: Vehicle Routing. **Handbooks in Operations Research and Management Science**, p. 367-428, 2007.
- CREVIER, Benoit; CORDEAU, Jean-François; LAPORTE, Gilbert. The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. **European Journal of Operational Research**, p. 756-773, jan 2007.
- CUNHA, Claudio Barbieri da. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Transportes**, v. 8, p. 51-74, 2000.
- CUNHA, Claudio Barbieri. **Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais**. São Paulo, 1997. 222 p Tese - Epusp, Departamento de Engenharia de Transportes.
- FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto; TORRES, Isaac Guillermo Espinosa. **TRANSPORTE PÚBLICO URBANO**. 2 ed. São Carlos: RiMa, 2004. 281 p.

GANHOTO, Marco Alves. **ABORDAGENS PARA PROBLEMAS DE ROTEAMENTO**. 2004 Dissertação (Mestre em Computação na Área de Engenharia de Software) - Universidade Estadual de Campinas.

GIL, ANTONIO CARLOS . **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3 ed. São Paulo: ATLAS, 1991. 101 p.

GOLDEN, Bruce L; DEARMON, James S; BAKER, Edward K. Computational experiments with algorithms for a class of routing problems. **Computers & Operations Research**, v. 10, p. 47-59, 1983.

HASSOLD, Stephan; CEDER, Avishai. Public transport vehicle scheduling featuring multiple vehicle types. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 67, p. 129-143, 2014.

HO, William *et al.* A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 21, p. 548-557, jun 2008.

HOFFMAN, Karla L; PADBERG, Manfred; RINALDI, Giovanni. Traveling salesman problem. **Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, 2001.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Conheça o Brasil - População: POPULAÇÃO RURAL E URBANA**. IBGE educa. 2015. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>. Acesso em: 15 jul. 2021.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos**. 2011. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/>. Acesso em: 27 mai. 2021.

ITDP, Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento. **Há espaço para mais carros?**. ITDP Brasil. 2016. Disponível em: <https://itdpbrasil.org.br/ha-espaco-para-mais-carros/>. Acesso em: 27 mai. 2021.

LAPORTE, Gilbert. What you should know about the vehicle routing problem. **Naval Research Logistics**, v. 54, p. 811-819, set 2007.

LEAL, Andréa. impactos do serviço de fretamento em são francisco. **Transporte por fretamento**. Tradução San francisco county transportation authority, v. 9, p. 18 -21, nov 2012. Tradução de: The Role of Shhuttle Services in San Francisco's Transportation System.

LIMA, Alberto. Transporte de passageiros por fretamento de ônibus e terminais de passageiros. **Revisra dos transportes públicos**, p. 27-32, 2001.

MACHADO, Juliana . **A cidade sem catracas - Parte I** : Cultura do automóvel. mobilize. 2011. Disponível em: <http://www.mobilize.org.br/noticias/791/a-cidade-sem-catracas--parte-i-cultura-do-automovel.html>. Acesso em: 14 out. 2021.

MAGAGNIN, Renata Cardoso; SILVA, Antônio Nélon Rodrigues da. A percepção do

especialista sobre o tema mobilidade urbana . **TRANSPORTES**, v. XVI, p. 25-35, jun 2008.

MAIOR, Caio Bezerra Souto *et al.* ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS PARA TRANSPORTE DE FUNCIONÁRIOS: ESTUDO DE CASO EM PERNAMBUCO . *In: XIX SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA*. 2019, Rio de Janeiro, 2019, p. 2504-2519.

MAJUMDER, Saibal; KAR, Samarjit; PAL, Tandra. Uncertain multi-objective Chinese postman problem. **Soft Computing**, v. 23, p. 11557-11572, 2019.

MILLER, C. E; TUCKER, A. W; ZEMLIN, R. A. Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. **Journal of the ACM**, v. 7, p. 326-329, 1960.

MIURA, Marcos. **RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS EM UMA EMPRESA TRANSPORTADORA** . SÃO PAULO, 2003. 89 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de produção) - Escola Politécnica.

NARUO, Mauro Kenji. **O estudo do consórcio entre municípios de pequeno porte para disposição final de resíduos sólidos urbanos utilizando sistema de informações geográficas**. São carlos, 2003. 287 p Dissertação (Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo.

NETO, Alberto Farkuh; LIMA, Renato da Silva. ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS DE UMA REDE ATACADISTA COM O AUXÍLIO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG). **Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção**, v. 5, p. 18-39, 2006.

PRETTO, Fabrício *et al.* PICKBUS:: UMA SOLUÇÃO PARA SERVIÇOS DE TRANSPORTE FRETADO DE PASSAGEIROS. **Destques Acadêmicos**, Lajeado, v. 13, p. 167 - 187, 2021.

PRODANOV , Cleber Cristiano Prodanov ; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico - 2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

REIS, Manoel de Andrade e Silva. MOBILIDADE URBANA:: UM DESAFIO PARA GESTORES PÚBLICOS. **Cadernos FGV Projetos**, v. 9, 2014.

RONEN, David. Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 35, p. 137-145, 1988.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da pesquisa-ação**. Cortez, 1985. 132 p.

TOTH, Paolo; VIGO, Daniele. **Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications**. 2 ed. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. 480 p.

TSUDA, Diogo Seijiy. **MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS EM UMA EMPRESAIMPORTADORA DE PRODUTOS JAPONESSES**. SÃO PAULO, 2007. 144 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) - Escola Politécnica

da Universidade de São Paulo.

VASCONCELLOS, Eduardo de Alcântara. os serviços de transporte de passageiros por fretamento. **Transporte por fretamento**, v. 9, p. 26-45, nov 2012.

VUCHIC, Vukan R.. **Urban Transit Systems and Technology**. John Wiley & Sons, f. 301, 2007. 602 p.

YUAN, Shuai *et al.* A new crossover approach for solving the multiple travelling salesmen problem using genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 228, p. 72-82, 2013.