

**Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Civil**

Julio Hideki Watanabe

Estudo de roteirização de veículos para distribuição de carga em Santa Catarina

24 de novembro de 2016

Julio Hideki Watanabe

Estudo de roteirização de veículos para distribuição de carga em Santa Catarina

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado pelo acadêmico Julio Hideki Watanabe à banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Professor orientador: Alexandre Hering Coelho,
Dr.

24 de novembro de 2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Watanabe, Julio Hideki

Estudo de roteirização de veículos para distribuição de carga em Santa Catarina / Julio Hideki Watanabe ; orientador, Alexandre Hering Coelho - Florianópolis, SC, 2016.

79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Transporte rodoviário de carga. 3. Problema de roteirização de veículos. 4. Sistema de informações geográficas. I. Coelho, Alexandre Hering. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Julio Hideki Watanabe

**ESTUDO DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS PARA
DISTRIBUIÇÃO DE CARGA EM SANTA CATARINA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do grau de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 24 de Novembro de 2016.

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.
Orientador

Prof. Amir Mattar Valente, Dr.
membro

Jorge Destri Jr., Dr.
membro

Dedicatória

Este trabalho é dedicado à minha mãe, senhora Cinira Watanabe, que mesmo após o falecimento do meu pai, desempenhou amavelmente seu papel de mãe mesmo em momentos difíceis.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente ao professor Alexandre por repassar, sempre de forma amigável, sua ampla experiência com problemas oriundos da área de transportes.

Agradeço também à minha família, que me apoiou durante todos estes anos no curso de Engenharia Civil, sem este apoio provavelmente não conseguiria chegar até o fim deste curso.

Resumo

O presente trabalho pretende analisar a distribuição de carga de uma empresa hipotética, com o apoio de funcionalidades específicas de um sistema de informações geográficas. Esta ferramenta foi aplicada para a resolução de um Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janela de Tempo (PRPVJT), que é caracterizado por possuir uma frota de veículos homogênea e clientes com demandas determinísticas.

Inicialmente é feita uma revisão de literatura sobre o transporte rodoviário de cargas, sobre os grafos, que constituem o embasamento teórico do problema, sobre os sistemas de informações geográficas, que representam a ferramenta utilizada, sobre o custo do transporte rodoviário, que faz parte da solução do problema, e sobre os problemas de roteirização de veículos. Em seguida é feita a caracterização do problema, além de apresentar um procedimento para a modelagem da área de estudo e de apresentar a ferramenta utilizada.

Como resultados são apresentadas as rotas otimizadas segundo o critério de menor tempo de percurso, o dimensionamento da frota de veículos e os custos operacionais de cada veículo. Após gerados, os resultados são comparados com dados de volumes médios diários das rodovias para fins de validação.

Palavras-chave: Transporte rodoviário de carga, problema de roteirização de veículos, sistema de informações geográficas.

ABSTRACT

This work aims to analyze a cargo distribution of a hypothetical company with the support of specific features of a geographic information system. This tool was applied to solve a vehicle routing and scheduling problem with time windows (VRSPTW), which is characterized by a homogeneous fleet of vehicles and a deterministic customer demand.

We begin with a review of the literature on cargo transport, the grafos, which constitute the theoretical basis of the problem, the geographic information system, which represents the tool, the cargo transport cost, which is part of the solution; and the vehicle routing problem. After that, we define the problem, as well as present a procedure for modeling the study area and the tool used.

As a result, we present the optimized routes according to the criterion of less travel time, the sizing of the fleet of vehicles and the operating costs of each vehicle. Once generated, the results are compared with annual average daily volumes of highways for validation purposes.

Key-words: Cargo transport, vehicle routing problem, geographic information system.

Lista de Figuras

1	Evolução da matriz de transporte brasileira entre 1950 e 1963.	4
2	Exemplos de rodovias segundo a nomenclatura	5
3	Evolução do investimento federal em infraestrutura de transporte com relação ao PIB(%), de 1975 a 2014	6
4	Evolução da frota brasileira, por tipo de veículo (2010 a 2015)	7
5	Resumo das características - extensão total das rodovias, dados levantados em 2015	7
6	As pontes de <i>Königsberg</i> e seu grafo	10
7	Grafo valorado	11
8	Grafo regular de grau três	12
9	Grafos completos	12
10	Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica	16
11	Componentes principais de um SIG	17
12	Modelagem do jogo de Hamilton	30
13	Localização da área de estudo	35
14	Participação relativa das macrorregiões no PIB de Santa Catarina	35
15	População relativa das macrorregiões de Santa Catarina	36
16	Classificação das rodovias presentes nos dados levantados	38
17	Especificações do veículo 3C	39
18	Tipo de veículo por segmento transportado	39
19	Modelos de caminhões mais emplacados / Categoria semipesados	39
20	Distribuição dos dados levantados	42
21	Exemplo de linhas com partes única e múltiplas	44
22	Exemplo de intersecção de linhas	44
23	Exemplo de linhas com pseudo nó	44
24	Representação dos dados processados	45
25	<i>Geodatabase</i> acessado pelo <i>ArcCatalog</i>	51
26	Distribuição dos dados contidos no <i>Geodatabase</i>	52
27	Barra de ferramentas do <i>Network Analyst</i>	52
28	Janela geral do <i>Network Analyst</i>	53
29	Janela de propriedades do <i>Network Analyst</i>	54
30	Distribuição das rotas dos veículos	55
31	Rota do veículo 01	57
32	Rota do veículo 02	58

33	Rota do veículo 03	60
34	Rota do veículo 04	62
35	Rota do veículo 05	64
36	Comparação da distância percorrida no experimento por veículo	65
37	Variação do custo de um veículo tracionando carreta de 3 eixos com o estado do pavimento.	69
38	Comparação entre as rotas dos veículos e o VMDa das rodovias.	75

Lista de Tabelas

1	Classificação das aplicações de SIG	19
2	Demanda dos clientes	46
3	Janelas de tempo dos clientes	47
4	Janela de tempo do depósito	47
5	Fórmulas para estimação de V_{85} com base no IGH	49
6	Tabela resumo do veículo 01	56
7	Resumo da rota do veículo 01	56
8	Tabela resumo do veículo 02	57
9	Resumo da rota do veículo 02	58
10	Tabela resumo do veículo 03	59
11	Resumo da rota do veículo 03	61
12	Tabela resumo do veículo 04	61
13	Resumo da rota do veículo 04	61
14	Tabela resumo do veículo 05	63
15	Resumo da rota do veículo 05	63
16	Calculo do custo diário do veículo 01	70
17	Calculo do custo diário do veículo 02	71
18	Calculo do custo diário do veículo 03	72
19	Calculo do custo diário do veículo 04	72
20	Calculo do custo diário do veículo 05	73

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Transporte rodoviário de carga	3
2.1.1	Nomenclatura das rodovias	3
2.1.2	Classificação dos veículos segundo limite de peso	6
2.2	Grafos	9
2.2.1	Origem e conceito	9
2.2.2	Classificação dos grafos	10
2.2.3	Propriedades de um grafo	13
2.3	Sistema de Informações Geográficas (SIG)	14
2.3.1	Breve histórico	14
2.3.2	Componentes	15
2.3.3	Aplicações de SIG	17
2.4	Custo do transporte rodoviário	18
2.4.1	Custo fixo	18
2.4.2	Custo variável	22
2.4.3	Custo total	24
2.5	Problema de roteirização de veículos	24
2.5.1	Problema básico de roteirização de veículo e suas extensões	24
2.5.2	Classificação dos problemas de roteirização	28
2.5.3	Problemas clássicos de roteirização	30
3	Materiais e método	34
3.1	Caracterização do problema	34
3.1.1	Área de estudo	34
3.1.2	Rodovias	36
3.1.3	Veículo	37
3.1.4	Classificação e descrição do problema de roteirização	38
3.2	Construção do modelo	41
3.2.1	Modelagem da infraestrutura	41

3.2.2	Modelagem da demanda	45
3.2.3	Modelagem do serviço	46
3.3	Emprego da ferramenta de roteirização	47
3.3.1	Critérios de impedância	48
3.3.2	Banco de dados geográficos do problema	50
3.3.3	Procedimento de simulação	51
4	Resultados	55
4.1	Soluções das roteirizações	55
4.1.1	Veículo 01	56
4.1.2	Veículo 02	56
4.1.3	Veículo 03	59
4.1.4	Veículo 04	59
4.1.5	Veículo 05	63
4.2	Custos operacionais dos veículos	65
4.2.1	Custos fixos	65
4.2.2	Custos variáveis	67
4.2.3	Custos operacionais segundo a produção	69
4.3	Validação do modelo	74
5	Conclusões e recomendações	76
	Referências	77

1 Introdução

Segundo o boletim estatístico de Julho de 2016, elaborado mensalmente pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2016), o modo de transporte rodoviário representa 61,1% de toda a carga transportada no país. Mostrando a importância das rodovias para a economia brasileira.

De acordo com a Pesquisa CNT de Rodovias 2015 (CNT, 2015), a infraestrutura deve fornecer suporte adequado para que o setor de transporte rodoviário desempenhe seu papel de forma eficaz promovendo a integração nacional. Contudo os resultados desta pesquisa mostram que a qualidade das rodovias brasileiras apresenta deficiências que comprometem a realização de deslocamentos internos de forma segura, rápida e eficiente.

Neste contexto, para que uma empresa possa garantir a distribuição de mercadorias entre cidades com eficácia é fundamental que se faça um estudo das rotas de entrega dos veículos, a roteirização. Atualmente são oferecidos diversos recursos tecnológicos baseados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para elaborar este estudo.

De acordo com CUNHA (2000), o problema de roteamento (ou roteirização) de veículos (do inglês americano "*routing*" ou britânico "*routeing*") consiste em determinar o(s) roteiro(s) para atendimento de um conjunto de pontos, buscando minimizar o custo total e assegurando que cada ponto seja visitado exatamente uma vez e a demanda em qualquer roteiro não exceda a capacidade do respectivo veículo.

O problema de roteirização aqui abordado possui caráter hipotético e consiste em uma transportadora que realiza a distribuição de mercadorias no Estado de Santa Catarina. A empresa possui um depósito no município de São José, onde todos os veículos devem partir e retornar e os clientes atendidos diariamente pela empresa possuem restrições de janelas de tempo, sendo que cada um deles deve ser visitado uma única vez.

Para resolução deste problema foi escolhida uma ferramenta SIG, esta escolha se justifica, pois, segundo MAPA; LIMA (2005), além de fazer análises e gerar mapas temáticos utilizando mapas digitalizados que contêm rodovias, estas ferramentas permitem ao usuário visualizar as rotas que foram geradas, o que facilita a representação visual, ampliando o entendimento do problema.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é modelar e analisar uma distribuição intermunicipal de mercadorias hipotética em Santa Catarina, com base na resolução do Problema de Roteirização e Programação de Veículos com Janela de Tempo, para fins de dimensionamento da frota de veículos, otimização das rotas de entregas quanto ao menor tempo de viagem e de análise dos custos operacionais, com e sem incremento devido ao estado geral de conservação das rodovias.

1.1.2 Objetivos específicos

- Criação de um problema hipotético de transporte rodoviário de cargas intermunicipal em Santa Catarina, utilizando fontes de dados confiáveis para a obtenção de informações de rodovias, veículos e cidades;
- Modelagem do problema, dentro da classe dos problemas de roteirização de veículos com janelas de tempo. Para fins de caracterizar a infraestrutura rodoviária da área de estudo, assim como definir as demandas e as características dos serviços dos clientes;
- Dimensionamento de uma frota de veículos, estimando a capacidade de carga e a quantidade de caminhões;
- Emprego de um Sistema de Informações Geográficas para a resolução do problema proposto, a fim de otimizar as rotas quanto ao menor tempo de percurso;
- Análise dos custos operacionais dos veículos utilizados no modelo, comparando os resultados dos custos com e sem o incremento devido ao estado geral de conservação das rodovias.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura que embasa o presente trabalho. Esta revisão consiste respectivamente na contextualização do trabalho, na apresentação da teoria matemática por trás do modelo de transporte proposto, na caracterização da ferramenta utilizada, na definição dos parâmetros para o cálculo dos custos de transporte e na apresentação dos problemas de roteirização de veículos.

2.1 Transporte rodoviário de carga

"Governar é abrir estradas". A frase do então presidente Washington Luís materializou-se em 25 de agosto de 1928, com a inauguração da Rio-Petrópolis (primeira rodovia asfaltada do país), sendo esta o marco inicial do setor rodoviário no Brasil.

Conforme relatado em GEIPOT (2001), no período entre 1950 e 1960, três grandes fatores geraram profundas alterações na economia e foram responsáveis pelo definitivo desenvolvimento do sistema rodoviário nacional:

1. A criação, em 1954, da Petrobras, com suas fábricas de asfalto instaladas estrategicamente, contribuindo para o desenvolvimento da pavimentação no país;
2. A implantação da indústria automobilística, que contribuiu para o avanço do nosso processo de industrialização; e
3. A construção de Brasília, cuja localização gerou a necessidade de implantação de grandes eixos rodoviários integrando-a a todas as regiões do país.

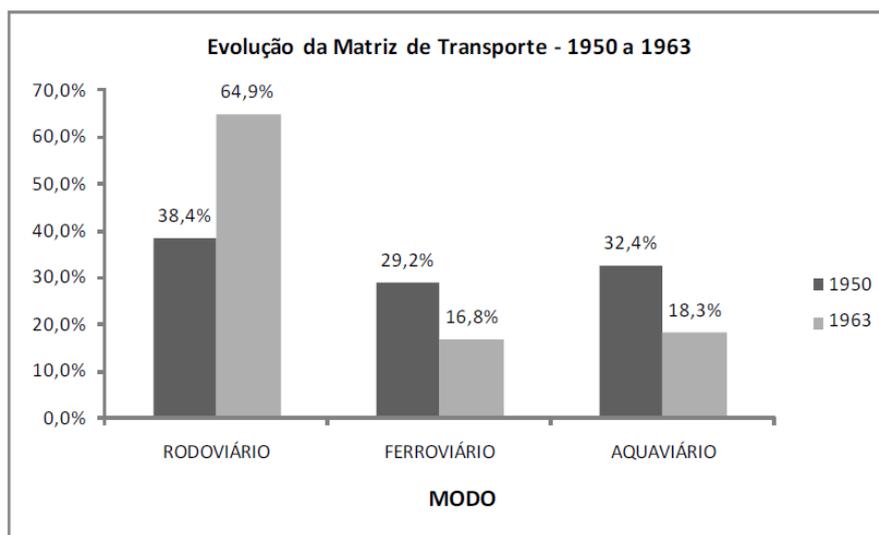
A Figura 1 mostra um gráfico da evolução histórica da matriz de transportes nacional, apresentado por GONÇALVES (2013) com os dados contidos em GEIPOT (2001). Segundo o gráfico, em um período de 13 anos (entre 1950 e 1963), a participação do transporte rodoviário no transporte de carga subiu de 38% para mais de 64%, enquanto na ferrovia decresceu de 29,2% para 16,8% e o transporte marítimo de 32,4% para 18,3%.

Dentro do contexto do transporte rodoviário de carga, este capítulo faz um breve estudo sobre os elementos físicos que constituem o modo rodoviário, abrangendo as vias quanto a nomenclatura e os veículos quanto a classificação segundo o critério de peso.

2.1.1 Nomenclatura das rodovias

Um importante elemento que constitui o modelo proposto pelo presente problema são as rodovias, a nomenclatura das vias expressa não só um meio de distinção, como também características geográficas. Esta seção aborda a caracterização das rodovias segundo a nomenclatura.

Figura 1: Evolução da matriz de transporte brasileira entre 1950 e 1963.



Fonte: GONÇALVES (2013) apud GEIPOT (2001)

De acordo com o Roteiro Básico para Sistemas Rodoviários Estaduais (DNIT, 2006), em cada unidade da federação, o Sistema Rodoviário Nacional (SRN) é constituído pelos sistemas rodoviários federal, estadual e municipal. As redes destes sistemas devem compatibilizar suas funções de modo a otimizar o atendimento às necessidades do transporte rodoviário na unidade da Federação.

A nomenclatura das rodovias é definida, segundo o Plano Nacional de Viação (PNV), pela sigla BR, caso seja uma rodovia federal, ou pela sigla do estado ao qual pertence, caso seja uma rodovia estadual, seguida por três algarismos.

O primeiro algarismo indica a categoria da rodovia, e os dois outros algarismos definem a posição, a partir da orientação geral da rodovia, relativamente à Capital Federal e aos limites do País (Norte, Sul, Leste e Oeste). A seguir são apresentadas as classes de rodovias segundo sua nomenclatura:

2.1.1.1 Rodovias Radiais

São as rodovias que partem da Capital Federal em direção aos extremos do país, sendo o primeiro algarismo 0 (zero), e os restantes podendo variar de 05 a 95, segundo a razão numérica 05 e no sentido horário. A Figura 2 (a) mostra exemplos de rodovias radiais.

2.1.1.2 Rodovias Longitudinais

São as rodovias que cortam o país na direção Norte-Sul, sendo o primeiro algarismo 1 (um), e os restantes podendo variar de 00, no extremo leste do País, a 50, na Capital, e de 50 a 99,

no extremo oeste. O número de uma rodovia longitudinal é obtido por interpolação entre 00 e 50, se a rodovia estiver a leste de Brasília, e entre 50 e 99, se estiver a oeste, em função da distância da rodovia ao meridiano da Capital Federal. A Figura 2 (b) mostra exemplos de rodovias longitudinais.

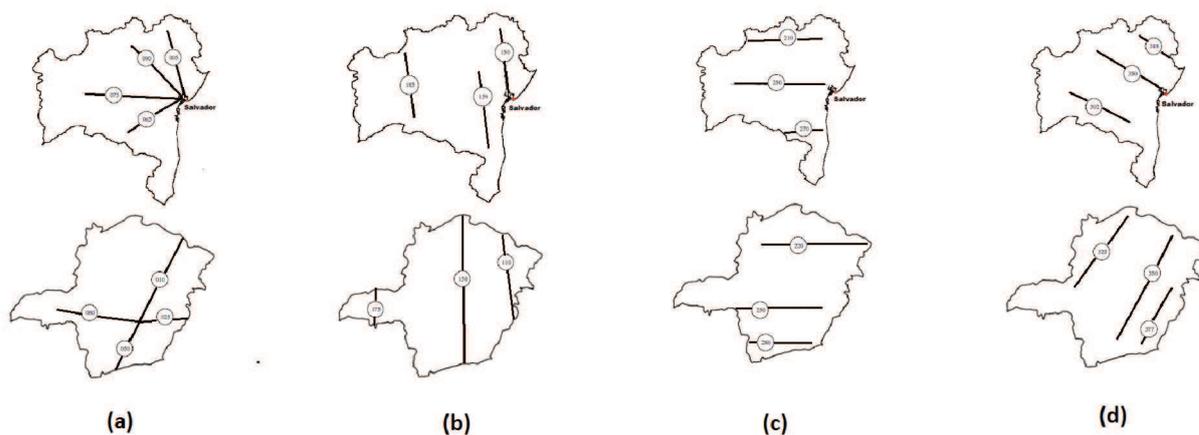
2.1.1.3 Rodovias Transversais

São as rodovias que cortam o país na direção Leste-Oeste, sendo o primeiro algarismo 2 (dois), e os restantes podendo variar de 00, no extremo norte do país, a 50, na Capital Federal, e de 50 a 99 no extremo sul. O número de uma rodovia transversal é obtido por interpolação, entre 00 e 50, se a rodovia estiver ao norte da Capital, e entre 50 e 99, se estiver ao sul, em função da distância da rodovia ao paralelo de Brasília. A Figura 2 (c) mostra exemplos de rodovias transversais.

2.1.1.4 Rodovias Diagonais

Estas rodovias podem apresentar dois modos de orientação: noroeste-sudeste ou nordeste-sudoeste. Sendo o primeiro algarismo 3 (três), e os restantes podendo variar segundo números pares, de 00 (no extremo nordeste do país) a 50 (em Brasília), e de 50 a 98 (no extremo sudoeste), caso possua orientação noroeste-sudeste, ou segundo números ímpares, de 01 (no extremo noroeste do país) a 51 (em Brasília), e de 51 a 99 (no extremo sudeste), caso possua orientação nordeste-sudoeste. A Figura 2 (d) mostra exemplos de rodovias diagonais.

Figura 2: Exemplos de rodovias segundo a nomenclatura

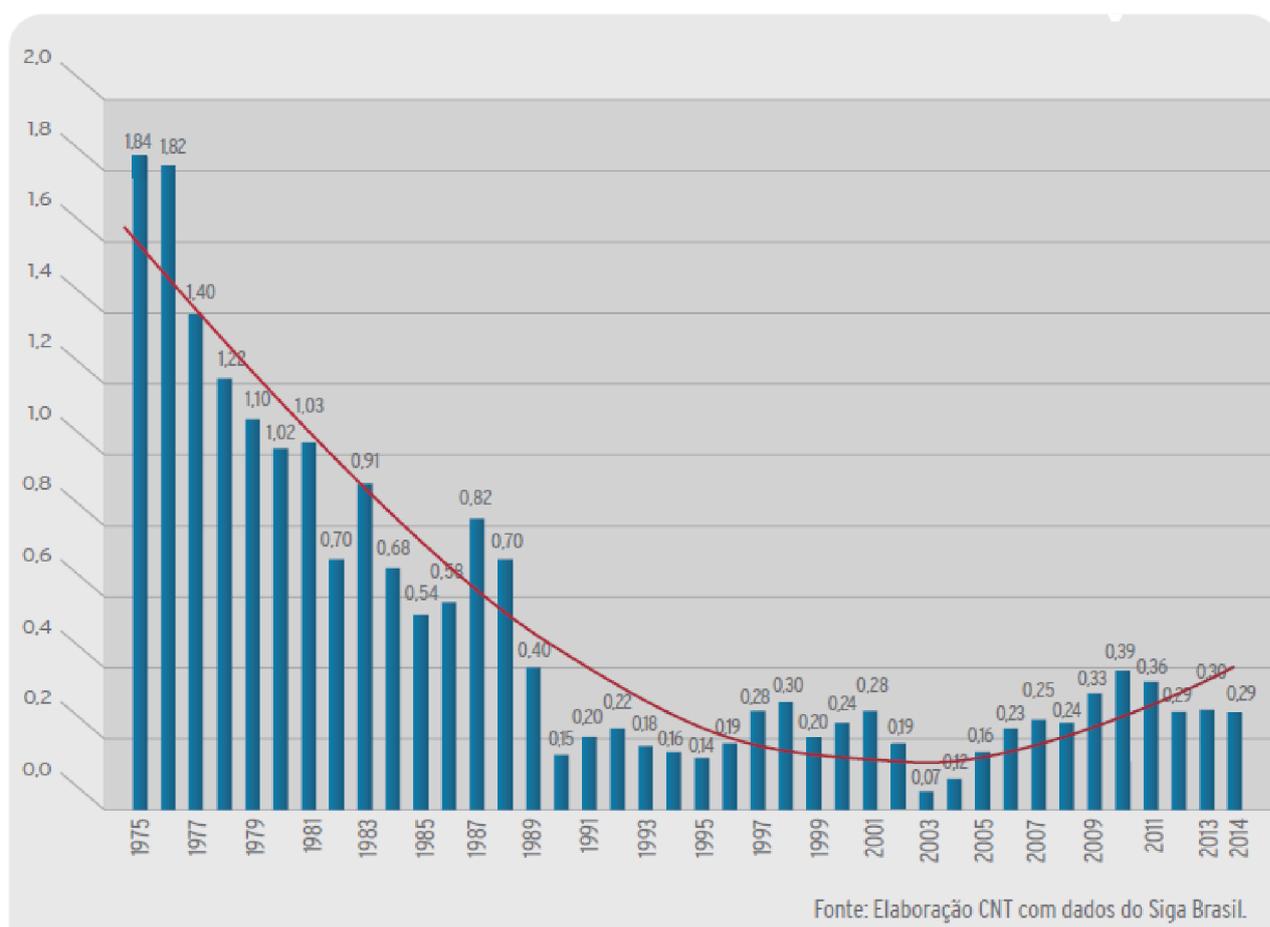


Fonte: DNIT (2006)

2.1.2 Classificação dos veículos segundo limite de peso

Analisando a relação entre os recentes investimentos governamentais no setor de infraestrutura rodoviária (Figura 3) e a evolução do uso do modo rodoviário de transportes, enquanto o número de veículos apresentou crescimento significativo (Figura 4), os investimentos em infraestrutura de transportes mostraram trajetória decrescente. Este cenário resultou na deterioração da atual infraestrutura nacional, como mostra os resultados de 2015 da pesquisa CNT de Rodovias, representados pela Figura 5.

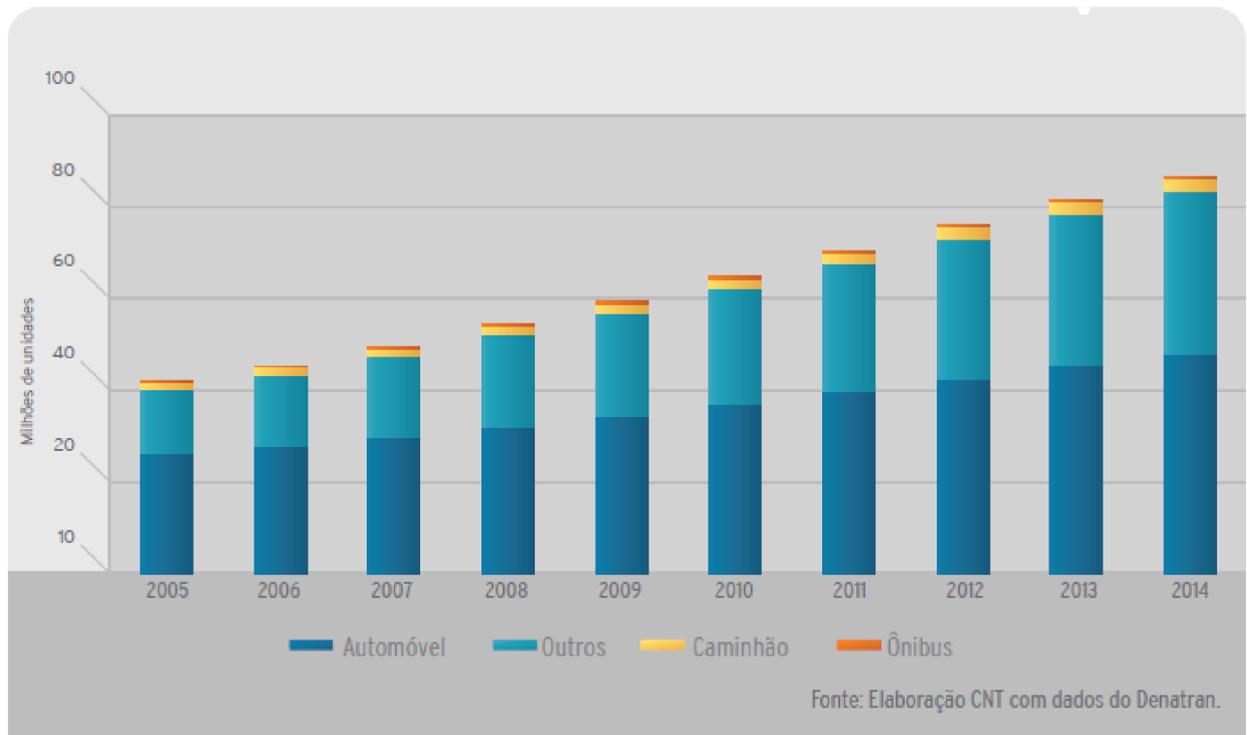
Figura 3: Evolução do investimento federal em infraestrutura de transporte com relação ao PIB(%), de 1975 a 2014



Fonte: CNT (2015)

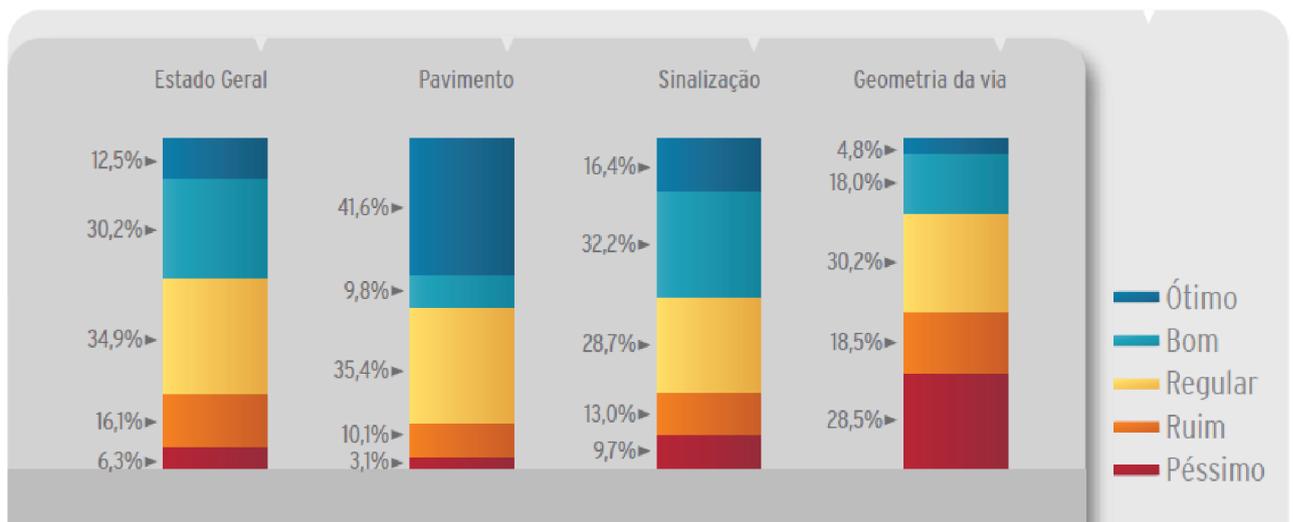
Visto que, o excesso de carga praticado por parte dos transportadores é uma das maiores causas da deterioração dos pavimentos (ALBANO, 2006), o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) limita o peso máximo por eixo de veículos de carga, assim como o peso bruto total do veículo, para fins de regular o trânsito de caminhões pesados nos centros urbanos, limitando o quantitativo de carga dos caminhões que trafegam em áreas com maior densidade populacional. Portanto, o peso máximo por eixo é um dos parâmetros de definição do veículo

Figura 4: Evolução da frota brasileira, por tipo de veículo (2010 a 2015)



Fonte: CNT (2015)

Figura 5: Resumo das características - extensão total das rodovias, dados levantados em 2015



Fonte: CNT (2015)

de projeto do presente trabalho.

A seguir são apresentados os tipos de veículos de carga, segundo o CONTRAN:

- **Veículo Urbano de Carga (VUC):** Caminhão de menor porte, mais apropriado para áreas urbanas em função de sua flexibilidade e de baixa taxa de poluição, apresentando

as seguintes características: capacidade de carga de 3 toneladas, largura máxima de 2,2 metros e comprimento máximo de 6,3 metros.

- **Toco ou caminhão semi-pesado:** Caminhão que tem eixo simples na carroceria, ou seja, um eixo frontal e outro traseiro de rodagem simples, com capacidade de carga de até 6 toneladas e peso bruto máximo de 16 toneladas, com comprimento máximo de 14 metros.
- **Truck ou caminhão semi-pesado:** Caminhão que tem o eixo duplo na carroceria, ou seja, dois eixos juntos. O objetivo é carregar carga maior e proporcionar melhor desempenho ao veículo. Sua capacidade de carga varia de 10 a 16 toneladas, possui peso bruto máximo de 23 toneladas e seu comprimento é, também, de 14 metros como no caminhão toco.
- **Carretas:** Categoria em que uma parte possui a força motriz (motor), rodas de tração, a cabine do motorista e a outra parte recebe a carga. A parte motriz recebe o nome de cavalo mecânico, e este pode ser acoplado a diferentes tipos de módulos de carga chamados de semirreboque. A sua capacidade de carga pode variar de 33 a 45 toneladas. Menos flexível e de menor agilidade, oferece capacidade de carga, segundo o número de eixos.
- **Bitrem ou treminhão:** Combinação de veículos de carga composta por um total de sete eixos, permitindo o transporte de um peso bruto total de carga de 57 toneladas. Os semirreboques podem ser tracionados por um cavalo-mecânico trucado.
- **Rodotrem:** Combinação de veículos de carga (dois semi-reboques) composta por um total de 9 eixos que apresenta capacidade de carga de até 74 toneladas. Os dois semi-reboques dessa combinação são interligados por um veículo intermediário, denominado Dolly. Essa combinação só pode ser tracionada por um cavalo-mecânico trucado, e necessita de um trajeto definido para obter autorização especial de trânsito.

Além da classificação do CONTRAN, a classificação apresentada por DNIT (2006) é utilizada para definição do veículo de projeto. Esta define diversas classes representadas por um código alfanumérico.

Este código é composto por três elementos, o primeiro um algarismo que representa o número de eixos do veículo simples ou da unidade tratora, o segundo uma letra que simboliza o tipo de veículo, e por último, caso exista, um número que indica a quantidade de eixos da(s) unidade(s) rebocada(s). As letras que representam o segundo elemento da código são:

- C = veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;

- S = veículo trator (cavalo mecânico) + semi-reboque;
- I = veículo trator + semi-reboque com distância entre-eixos $> 2,40$ m (eixos isolados);
- J = veículo trator + semi reboque com um eixo isolado e um eixo em tandem;
- D = combinação dotada de 2 (duas) articulações;
- T = combinação dotada de 3 (três) articulações;
- Q = combinação dotada de 4 (quatro) articulações;
- X = veículos especiais;
- B = ônibus.

2.2 Grafos

De acordo com FEOFILLOF (2011), a teoria dos grafos estuda sistemas compostos por elementos combinatórios denominados grafos. Tais sistemas são um bom modelo para muitos problemas de matemática, computação, engenharia, indústria e transportes.

Visto a importância dos grafos para a modelagem de problemas de transportes, incluindo o problema deste trabalho, a seguir é apresentado um estudo sobre os grafos quanto a sua origem e conceito, suas classificações e os elementos que o constituem.

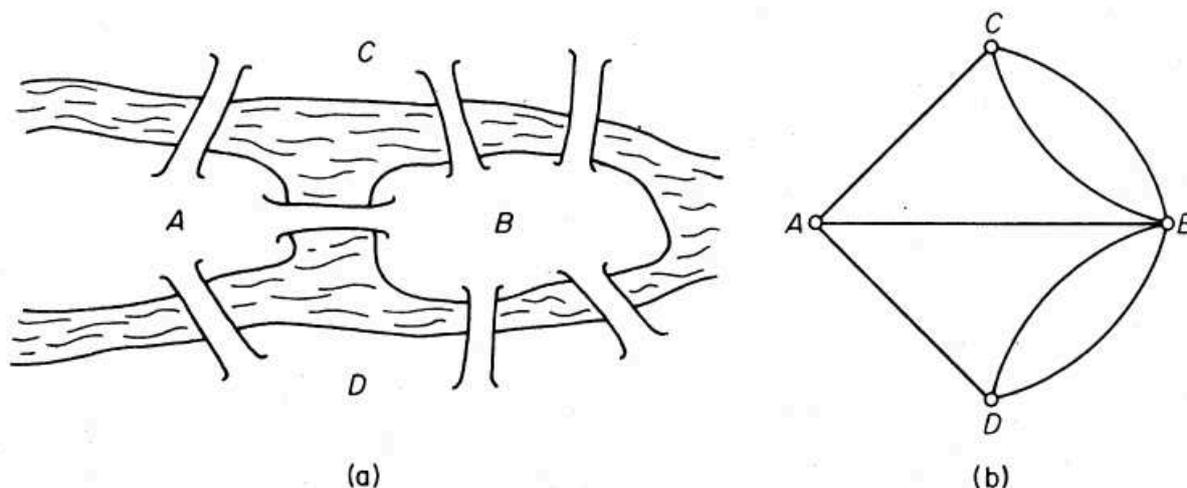
2.2.1 Origem e conceito

A origem da teoria dos grafos esta associada ao caminho de Euler, matemático suíço, que, segundo BONDY; MURTY (1976), foi o primeiro a modelar um problema na forma de grafo. Euler mostrou em seu modelo que era impossível atravessar cada uma das sete pontes de *Königsberg* somente uma vez durante o mesmo percurso.

Um esquema das pontes de *Königsberg* e do rio Prególia é mostrado na Figura 6 (a). O grafo do modelo que Euler utilizou para provar a impossibilidade de resolução do problema é representado na Figura 6 (b).

”Formalmente, um grafo $G = (X, A)$ é uma estrutura composta por um conjunto $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ de elementos chamados vértices ou nós e um conjunto $A = \{a^1, a^2, \dots, a^n\}$, de pares de elementos, chamados arcos ou arestas. O elemento $a^k = (x_i, x_j)$ é um arco que possui como extremidades os vértices x_i e x_j que pertencem ao conjunto X.” (CAMPOS, 1997)

Figura 6: As pontes de Königsberg e seu grafo



Fonte: BONDY; MURTY (1976)

De acordo com BONDY; MURTY (1976), os vértices e as arestas de um grafo são representados respectivamente por pontos e linhas. E o nome grafo é justificado pelo seu poder de representação gráfica, o que contribui para o entendimento de suas propriedades.

2.2.2 Classificação dos grafos

Esta seção pretende enunciar alguns dos principais tipos de grafos conforme relatado por diversos autores, com o intuito de, posteriormente, enquadrar o grafo gerado pelo modelo.

2.2.2.1 Grafo orientado ou dígrafo

Segundo CAMPOS (1997), os grafos podem ser orientados ou não orientados. São orientados quando seus arcos têm um sentido definido, ou seja, um nó definido como extremidade inicial (origem) e o outro nó de extremidade final (destino). Os arcos orientados são representados por uma seta indicando o sentido dos mesmos. Nos grafos não orientados não existe esta noção de sentido único e, nestes casos, os arcos são chamados de arestas.

Os grafos orientados ainda podem ser denominados Dígrafos, de acordo com PAULA (2009), um grafo $D = (V, E)$ é dito direcionado ou dirigido (dígrafo) se ele é constituído de um conjunto finito não vazio V (vértices) e um conjunto E (arestas orientadas) de pares ordenados de vértices. Portanto em um dígrafo cada aresta (v, w) possui uma única direção de v para w .

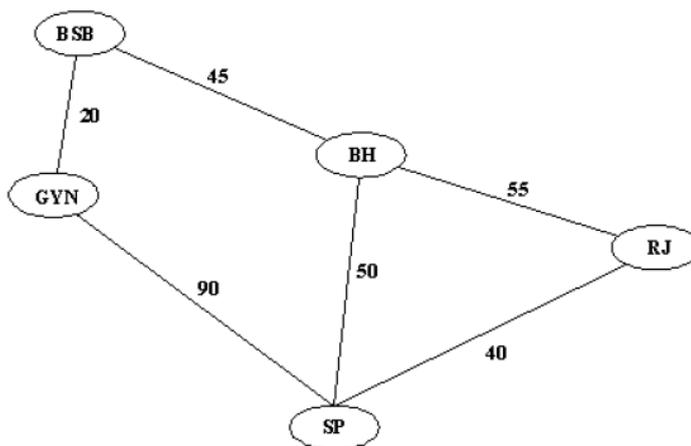
2.2.2.2 Grafo valorado

Segundo CAMPOS (1997), os grafos podem ter ou não escalas ou como também é dito, podem ser ou não valorados. Nos grafos valorados os arcos recebem valores ou pesos, positivos ou negativos. Num caso mais complexo, é possível atribuir valores tanto a arcos quanto aos nós. Uma rede é um grafo valorado.

Já PAULA (2009) define esse tipo de grafo como um grafo que possui funções relacionando V e/ou E com um conjunto de números. Na maioria das aplicações de grafos em problemas de engenharia, é necessária a consideração de grandezas tais como distâncias, altitudes, capacidades, fluxos, etc., associadas a localidades, estradas, entre outras que definem os nós e os arcos (ou arestas) do grafo.

A Figura 7 representa um grafo valorado, onde os nós representam cidades e os arcos representam pontes aéreas, com seus respectivos valores de tempo de vôo.

Figura 7: Grafo valorado



Fonte: PAULA (2009)

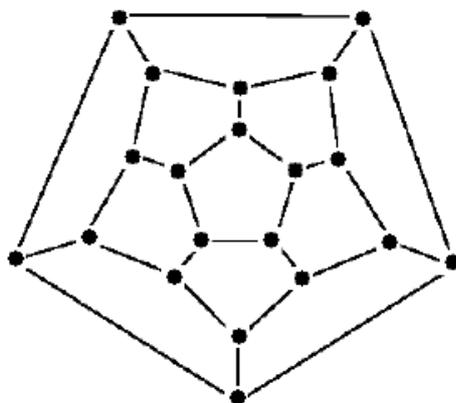
2.2.2.3 Grafo regular

De acordo com PAULA (2009), um grafo pode ser definido como regular quando todos os seus nós tem o mesmo grau, sendo o grau de um grafo dado pelo número de arcos que lhe são incidentes. A Figura 8 mostra um grafo regular de grau três.

2.2.2.4 Grafo planar

Segundo CAMPOS (1997), um grafo planar é aquele em que os arcos somente se tocam sobre um vértice ou nó, podendo consequentemente, ser projetado sobre um plano sem perder suas

Figura 8: Grafo regular de grau três



Fonte: PAULA (2009)

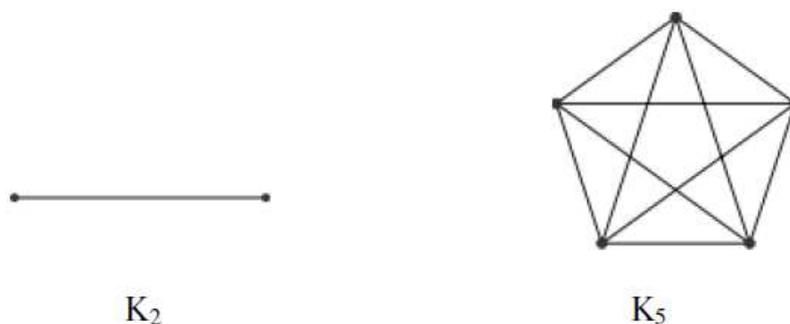
características. Um grafo não-planar, no entanto, quando projetado sobre um plano, apresenta interseções de arcos não coincidentes com um nó, em virtude de sua estrutura espacial.

Quando um grafo G admite uma representação em uma superfície S , sem que existam arestas que se intersectem, diz-se que G é realizável em S . De acordo com CARDOSO (2005), um grafo diz-se planar se é realizável no plano, contudo, apesar de um dado grafo admitir uma representação com arestas cruzadas, isso não significa que esse grafo não seja planar.

2.2.2.5 Grafo completo

Segundo PAULA (2009), um grafo é designado completo quando todos os seus nós são adjacentes a todos os outros nó. Geralmente este grafo é designado por K_n , onde n é o número de nós. A Figura 9 mostra dois grafos completos, o primeiro com K_2 e o segundo com K_5 .

Figura 9: Grafos completos



Fonte: PAULA (2009)

2.2.3 Propriedades de um grafo

Um grafo pode possuir diversas propriedades que o caracterizam, e o conhecimento destas propriedades é importante para a compreensão de redes de transporte embasados por estas estruturas. Segundo CAMPOS (1997), os grafos possuem as seguintes propriedades:

- **Laço:** É um arco que se inicia num nó e termina nele mesmo;
- **Arco ou nó incidente:** Um arco ou nó é incidente a outro nó quando este é destino ou origem do arco. Nos grafos orientados, diz-se que um arco é incidente interiormente a um nó quando este é destino deste arco, ou incidente exteriormente quando o mesmo é origem do arco;
- **Grau de um nó:** É medido pelo número de arcos incidentes num determinado nó. No caso de grafo orientado existe a noção de semigrau interior, número de arcos incidentes interiormente ao nó (chegando à ele), e semigrau exterior que corresponde ao número de arcos incidentes exteriormente ao nó (saindo dele);
- **Vértices adjacentes:** Dois vértices são considerados adjacentes um ao outro se existe um arco unindo-os;
- **Cadeia:** Uma cadeia é uma sequência de arcos de um grafo (orientado ou não), tal que cada arco tem uma extremidade em comum com o antecedente (à exceção do primeiro) e a outra extremidade em comum com o arco subsequente (à exceção do último). O conceito de cadeia é de grafo não-orientado e o tamanho de uma cadeia corresponde ao número de arcos que a compõem;
- **Caminho:** Caminho é uma cadeia na qual todos os arcos possuem o mesmo sentido. O conceito de caminho, é portanto, orientado;
- **Cadeia ou caminho simples:** Uma cadeia ou um caminho são considerados simples quando não repetem ligações (arcos). São elementares quando não repetem vértices;
- **Ciclo:** Ciclo é uma cadeia simples na qual o nó inicial e o nó final se confundem (cadeia fechada);
- **Circuito:** Circuito é um caminho simples e fechado em um grafo orientado.

2.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Diversos autores enunciam o conceito de Sistema de Informações Geográficas, estas definições refletem a relação indispensável entre o usuário e a tecnologia, bem como, a obrigatoriedade dos dados descreverem características geográficas. A seguir são apresentados dois desses conceitos.

Segundo DANTAS et al. (1997), Sistema de Informações Geográficas configura-se como um sistema de informação espacial que agrega elementos de tecnologia (equipamentos e programas), de banco de dados (imagens, mapas, dados estatísticos, etc) e de pessoal (usuários treinados, manutenção e suporte técnico), que se interagem para a manipulação de dados através de procedimentos computacionais. E a capacidade de processar análises espaciais é o que difere um SIG de outros sistemas.

De acordo com CÂMARA et al. (1996), Sistema de Informações Geográficas é o sistema automatizado usado para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la.

Este capítulo pretende estudar os SIGs, quanto o seu histórico, componentes e aplicações.

2.3.1 Breve histórico

”O problema de análise e manipulação de entidades que existem em um contexto espaço-temporal não é novo. A forma mais antiga - e ainda mais comum - de processar e apresentar este tipo de dado é através de mapas. Os elementos de um mapa são em geral armazenados de forma georreferenciada segundo um sistema de coordenadas (latitude, longitude e elevação em relação ao nível do mar). A criação de mapas exige levantamento de dados, medidas de seus valores e localização, padronização, armazenamento e análise apresentação. Diversos mapas em papel podem ser processados de forma a correlacionar seus dados através de sua sobreposição sob forma de folhas transparentes. Todo esse processo - produção em papel, armazenamento, sobreposição - é muito caro do ponto de vista de armazenamento e atualização manual.” (CÂMARA et al., 1996)

Segundo ANTENUCCI et al. (1991) apud CÂMARA et al. (1996) as primeiras tentativas de automatizar o processamento de dados georreferenciados ocorreram nos anos 50, na Grã Bretanha e nos Estados Unidos, visando diminuir os custos de produção e atualização de mapas. No primeiro caso, foi desenvolvido um sistema de produção de mapas para pesquisa em botânica. No segundo caso, tratava-se de um sistema desenvolvido em Chicago para mostrar graficamente o volume de tráfego, em algumas vias da cidade.

Conforme MATIAS (2001), os primeiros SIGs datam dos anos 60, no Canadá, eles podem ser atribuídos (do ponto de vista tecnológico) aos avanços na área da Informática. Porém, os sistemas de informações geográficas devem ser explicados pela necessidade de encontrar tecnologias cada vez mais potentes e adequadas para tratar e analisar a crescente complexidade da realidade geográfica no mundo contemporâneo.

Os Pacotes de SIG comerciais, segundo NAZÁRIO (1998), começaram a ser desenvolvidos nos anos 70, principalmente nos EUA e experimentaram rápido crescimento nos anos 80. Inicialmente, as empresas do governo eram os principais clientes destes produtos. No Brasil não foi diferente, as principais aplicações foram nos setores de energia e ambiental.

2.3.2 Componentes

CÂMARA et al. (1996) define os componentes de um sistema de informações geográficas quanto as suas funções. A adequação destas funções para a modelagem do presente problema foi um dos motivos pelo qual se escolheu a utilização de uma ferramenta SIG. Segundo o autor um SIG possui cinco componentes:

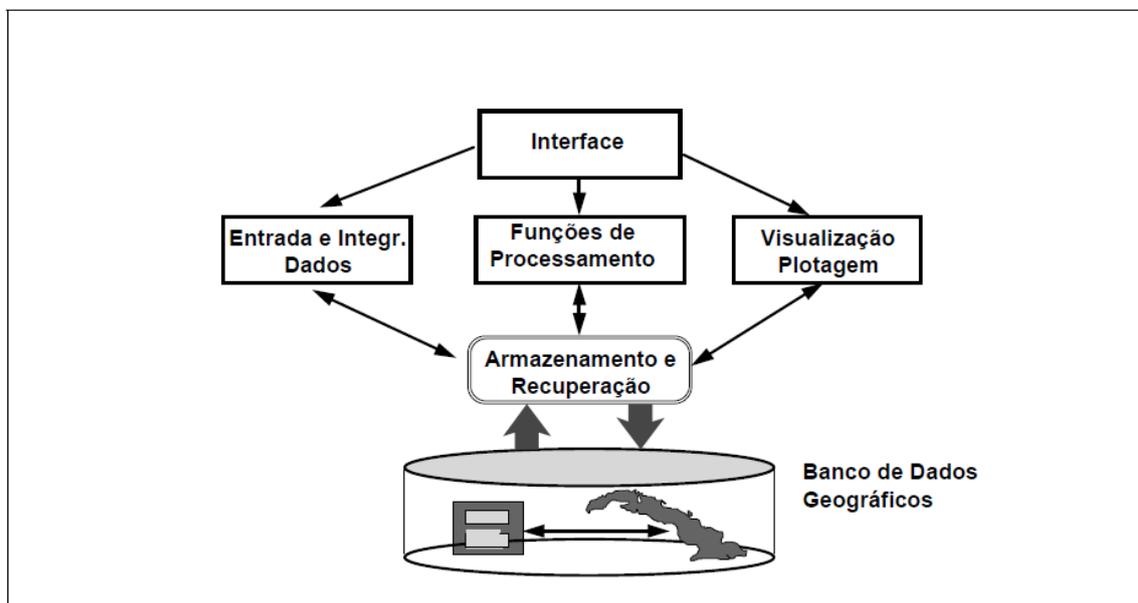
1. **Interface com usuário:** As primeiras interfaces utilizavam a linguagem de comandos, porém, mesmo possuindo um grande poder expressivo, torna-se complexa à medida em que o sistema cresce em funcionalidade. Para contornar este problema, foram criados ambientes computacionais interativos dando origem a interfaces baseadas em menus. Mais fáceis de operar, estas interfaces tendem a ter menor poder expressivo;
2. **Entrada e integração de dados:** Existem quatro formas principais de entrada de dados em SIGs: a entrada de dados via caderneta de campo, a digitalização em mesa, a digitalização ótica e a leitura de dados na forma digital, incluindo a importação de dados em outros formatos;
3. **Funções de processamento:** As funções de processamento são naturalmente dependentes dos tipos de dados envolvidos, sendo que o processamento digital de imagens envolve funções como retificação, contraste, filtragem, realce e classificação. Modelos numéricos de terreno permitem a geração de mapas de declividade e aspecto, cálculo de volumes, análise de perfis, além da própria geração do modelo a partir de pontos esparsos ou linhas, entre outras funções;
4. **Visualização e impressão:** Os ambientes de visualização de um sistema são consequência do paradigma adotado para a interface. Quanto à produção cartográfica, alguns sistemas dispõem de recursos altamente sofisticados de apresentação gráfica, englobando a

definição de uma área de plotagem, colocação de legendas, textos explicativos e notas de crédito;

5. **Armazenamento e recuperação de dados:** Os dados de um SIG são geralmente organizados sob a forma de um banco de dados geográficos. Tradicionalmente, os SIGs armazenavam os dados geográficos em arquivos internos. Este tipo de solução vem sendo substituída pelo uso cada vez maior de SGBD.

A Figura 10 mostra a disposição destes componentes na arquitetura de um SIG.

Figura 10: Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica



Fonte: (CÂMARA et al., 1996)

Já JUNIOR (2000), enfatiza a interação entre mundo real, usuários, hardware, software e banco de dados para se obter os resultados desejados. Esta interação também foi um dos motivos pela escolha de uma ferramenta SIG. De acordo com o autor, um sistema de informações geográficas possui os cinco seguinte componentes:

1. **Usuário:** Responsável por executar as análises e modelagens mais complexas;
2. **Hardware:** Composto pelos diversos componentes físicos do computador;
3. **Software:** São os programas especificamente construídos para atuarem nos SIG;
4. **Banco de dados:** Cujas função é registrar e manter as informações que vão ser utilizadas, podendo ser integrado ou compartilhado;

5. **Mundo real:** Representa todos os objetos geográficos da superfície ou sub-superfície da terra ou meio, cuja representação pode ser numérica ou gráfica.

A figura 11 mostra um esquema com os componentes de um SIG segundo JUNIOR (2000).

Figura 11: Componentes principais de um SIG



Fonte: JUNIOR (2000)

2.3.3 Aplicações de SIG

Vários autores citam as aplicações de SIG em diversas áreas do conhecimento, mostrando sua característica multidisciplinar. A seguir são apresentadas as visões de alguns destes autores sobre a aplicabilidade de SIG.

”O SIG é uma convergência de campos tecnológicos, dos quais provêm algumas técnicas e metodologias que implementam o sistema. Com base no aspecto de multidisciplinaridade do SIG pode-se observar sua aplicação em diversas áreas: planejamento urbano, geografia, agronomia, ambiental, florestal, engenharia, processamento de dados, pesquisa operacional, arquitetura e urbanismo, gerenciamento de serviços, engenharia de transportes e outros.” (ROSE, 2001)

De acordo com SANTOS; JUNIOR (2006), o termo Sistema de Informações Geográficas vêm sendo largamente utilizado para as operações que envolvam recursos tecnológicos associados a eventos espacialmente identificáveis, e é indicado para uma série de aplicações que envolvam

identificação, rastreamento, análises espaciais, levantamento e tratamento de informações e dados de maneira organizada.

Segundo DANTAS; TACO; YAMASHITA (1996) os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm se tornado um importante instrumento de auxílio na resolução de problemas de Transportes. Tal afirmação provém da constatação de que inúmeros estudos se utilizam desse tipo de sistema de informação no planejamento, na gestão, na operação e na análise de sistemas de transportes. As aplicações do SIG nos Transportes (SIG-T) são diversificadas, entre elas pode-se citar o Transporte Coletivo Urbano, Rodoviário, de Carga e na Engenharia de Tráfego.

CÂMARA et al. (1996) classificam as aplicações de SIG em socio-econômicas, envolvendo o uso da terra, seres humanos e infra-estrutura existente; ambientais, enfocando o meio ambiente e o uso de recursos naturais; e de gerenciamento, envolvendo a realização de estudos e projeções que determinam onde e como alocar recursos para remediar problemas ou garantir a preservação de determinadas características. A Tabela 1 mostra um resumo das aplicações de SIG segundo este autor.

2.4 Custo do transporte rodoviário

Esta seção pretende enunciar os parâmetros para o cálculo dos custos de transporte, segundo a resolução nº 4.810, da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), de 19 de agosto de 2015. Esta resolução estabelece metodologia e parâmetros de referência para cálculo dos custos de frete do serviço de transporte rodoviário remunerado de cargas.

Os custos aqui tratados são aqueles classificados como diretos, ou seja, referentes diretamente a cada operação. Cabe destacar que tais custos são compostos pelos custos fixos e variáveis e sofrem alterações conforme a operação, portanto, são custos referenciais.

Os custos indiretos, conhecidos como despesas administrativas da empresa, são aqueles que não estão relacionados diretamente com a operação do veículo. Estas despesas não foram abordadas pois não se encontram no escopo do trabalho.

2.4.1 Custo fixo

Representam as despesas operacionais do veículo que não variam com a distância percorrida, isto é, continuam existindo mesmo com o veículo parado. Geralmente são calculados por mês.

A seguir são apresentados os parâmetros de cálculo do custo fixo, segundo a resolução nº 4.810, de 19 de agosto de 2015.

Tabela 1: Classificação das aplicações de SIG

Fonte: CÂMARA et al. (1996) apud SALLES (2013)

Classificação	Descrição	Aplicação
Sócio-econômicas	São aquelas que envolvem o usos da terra, os seres humanos e a infraestrutura existente. Podem ser realizadas com o objetivo de planejamento ou avaliação de mudanças em uma região em resposta a uma determinada política.	<ul style="list-style-type: none"> • Uso da terra, que incluem cadastros rurais, agroindústria e irrigação; • Ocupação humana, composta por cadastros urbanos e regionais, sistemas de serviço de utilidade pública; • Atividades econômicas que envolvem marketing e indústrias.
Ambientais	São aquelas que visam o meio ambiente e o uso de recursos naturais	<ul style="list-style-type: none"> • Meio ambiente, que trata da ecologia, clima, gerenciamento florestal e poluição; • Uso dos recursos naturais, que trata do extrativismo vegetal e mineral, energia, recursos hídricos e oceânicos.
Gerenciais	São as que envolvem a realização de estudos e projeções que determinam onde e como alocar recursos para remediar problemas ou garantir a preservação de determinadas características	<ul style="list-style-type: none"> • Planejamento de tráfico urbano, incluindo roteamento de transporte coletivo, roteamento de coleta de lixo e outros; • Planejamento e controle de obras públicas e planejamento de defesa civil.

2.4.1.1 Reposição de veículo ou depreciação (RV)

Representa a quantia que deve ser destinada mensalmente a um fundo para aquisição de um novo veículo (VN) quando o atual completar seu ciclo de vida útil econômica. Considera-se que, no fim deste período (VV, em meses), é possível obter somando-se o fundo com o valor de revenda (VR) o valor do veículo novo. Assim, será necessário distribuir o valor perdido pelo período (VV).

$$RV = \frac{VN - VR}{VV} \quad (1)$$

onde:

VN = Valor de compra do veículo novo obtido em consulta as tabelas de mercado;

VR = Valor de revenda após o período de utilização obtido em consulta as tabelas de mercado;

VV = Período de utilização do veículo em meses. Para fins dessa metodologia considerou-se a idade média da frota nacional obtida no RNTRC.

2.4.1.2 Reposição do equipamento ou depreciação do equipamento/implemento (RE)

Da mesma forma que se estabelece um fundo para reposição do veículo, deve ser criado outro para a reposição do implemento rodoviário (carroçaria ou carreta):

$$RE = \frac{VNE - VRE}{VV} \quad (2)$$

onde:

VNE = Valor de compra do implemento novo obtido em consulta as tabelas de mercado;

VRE = Valor de revenda do implemento após o período de utilização obtido em consulta as tabelas de mercado;

VV = Período de utilização do implemento em meses. Para fins dessa metodologia considerou-se a idade média da frota nacional obtida no RNTRC.

2.4.1.3 Remuneração mensal do capital (RC)

Corresponde ao ganho no mercado financeiro caso o capital não tivesse sido usado para adquirir o veículo. Esta remuneração é determinada por meio da seguinte fórmula:

$$RC = VMV \cdot TRM \quad (3)$$

onde:

VMV = valor médio do veículo, que consiste na média aritmética dos valores do veículo novo e de revenda;

TRM = taxa de remuneração mensal, que corresponde a taxa de juros mensal da poupança.

2.4.1.4 Custos da mão de obra dos motoristas (CMO)

Foram adotadas as despesas básicas com o motorista empregado, acrescidas dos encargos sociais.

$$CMO = (1 + ES) \cdot SM \cdot NMV \quad (4)$$

onde:

ES = Razão entre Encargos Sociais incidentes e o salário do motorista;

SM = salário do motorista (média do piso salarial dos motoristas do setor);

NMV = n° de motoristas por veículo.

Para efeito de custo mínimo referencial considera-se um motorista por veículo.

2.4.1.5 Tributos incidentes sobre o veículo (TI)

Este item reúne as taxas e impostos que a empresa deve recolher antes de colocar o veículo em circulação nas vias públicas dividido pelo período de vigência das mesmas. Os comuns a todos os veículos são:

- Imposto sobre a propriedade de veículos automotores (IPVA). Periodicidade de 12 meses;
- Seguros por danos pessoais causados por veículos automotores (DPVAT). Periodicidade de 12 meses;
- Taxa de licenciamento (TL) paga ao Detran. Periodicidade de 12 meses;

$$TI = \frac{T_1}{P_1} + \frac{T_2}{P_2} + \dots + \frac{T_n}{P_n} \quad (5)$$

onde:

T_i = tributo para o período i ;

N_i = período i .

2.4.1.6 Custo de risco de acidente e roubo de veículo (SV)

Este custo representa um fundo mensal que deve ser formado para pagar o seguro ou cobrir eventuais sinistros (colisão, incêndio, roubo, etc) ocorridos com o veículo.

O custo do risco é igual ao prêmio do seguro (valor total a ser pago à seguradora), já considerado o IOF da operação. Todos os valores são fornecidos pelas seguradoras.

$$SV = \frac{PSV}{12} \quad (6)$$

onde:

PSV = prêmio do seguro do veículo.

2.4.1.7 Custo fixo mensal (CF)

O custo fixo mensal resulta da soma das sete parcelas:

$$CF = RV + RE + RC + CMO + TI + SV + SE \quad (7)$$

2.4.2 Custo variável

Correspondem a despesas que variam com a distância percorrida pelo veículo, ou seja, que inexistem caso o veículo permaneça parado.

A seguir são apresentados os parâmetros de cálculo do custo variável, segundo a resolução nº 4.810, de 19 de agosto de 2015.

2.4.2.1 Mão-de-obra, peças, acessórios e material de manutenção (PM)

Corresponde à previsão de despesas mensais com manutenção do veículo. Uma vez apuradas, essas despesas devem ser divididas pela quilometragem mensal percorrida, para se obter o valor por quilômetro.

$$PM = \frac{VN \cdot MP}{DM} \quad (8)$$

onde:

VN = Valor de compra do veículo novo obtido em consulta as tabelas de mercado;

DM = quilometragem média mensal rodada pelo veículo;

PM = razão entre o custo de manutenção mensal e o valor do veículo novo.

2.4.2.2 Combustível (DC)

São as despesas efetuadas com combustível para cada quilômetro rodado pelo veículo.

$$DC = \frac{PC}{RM} \quad (9)$$

onde:

PC = Preço médio nacional do litro de combustível obtido junto a ANP (Reais/litro);

RM = Rendimento médio do combustível (km/litro). Obtido através de pesquisa de mercado.

2.4.2.3 Aditivo ARLA32 (AD)

São as despesas efetuadas com o aditivo ARLA32 para cada quilômetro rodado pelos veículos que utilizam a tecnologia SCR para atender as exigências da PROCONVE P7 (EURO V).

$$AD = \frac{PA}{RA} \quad (10)$$

onde:

PA = Preço do aditivo (Reais/litro). Obtido através de pesquisa de mercado;

RA = Rendimento médio do aditivo (km/litro). Obtido através de pesquisa de mercado.

2.4.2.4 Lubrificantes (LB)

São as despesas com a lubrificação interna do motor. Além da reposição total do óleo, admite-se uma determinada taxa de reposição a cada 1.000 km.

$$LB = PLM \cdot \left(\frac{VC}{QM} + VR \right) \quad (11)$$

onde:

PLM = Preço unitário do lubrificante do motor (Reais/litro). Obtido através de pesquisa de mercado;

VC = Volume do cárter (litros). Obtido em consulta ao manual do veículo;

QM = Quilometragem de troca de óleo do motor. Obtido em consulta ao manual do veículo;

VR = Taxa de reposição (litros/1000 km). Obtido em consulta ao manual do veículo.

2.4.2.5 Lavagem e graxas (LG)

São as despesas com lavagem e lubrificação externa do veículo. O custo por quilômetro é obtido dividindo-se o custo de uma lavagem completa do veículo pela distância percorrida entre cada lavagem.

$$LG = \frac{PL}{QL} \quad (12)$$

onde:

PL = Preço da lavagem completa do veículo. Obtido através de pesquisa de mercado;

QL = Distância percorrida entre lavagens. Obtido através de pesquisa de mercado.

2.4.2.6 Pneus e recauchutagem (PR)

São as despesas resultantes do consumo dos pneus utilizados no veículo e também no equipamento, quando se tratar de reboque ou semirreboque. Deve-se considerar também que cada pneu possa ser recapado ao longo da sua vida útil.

$$PR = \frac{(P + C + PP + R \cdot NR) \cdot NP}{VP} \quad (13)$$

onde:

P = Preço do pneu novo. Obtido através de pesquisa de mercado;

C = Preço da câmara nova (quando houver). Obtido através de pesquisa de mercado;

PP = Preço do protetor novo (quando houver). Obtido através de pesquisa de mercado;

R = Preço da recauchutagem ou recapagem. Obtido através de pesquisa de mercado;

NR = Número médio de recauchutagens ou recapagens por pneu. Obtido através de pesquisa de mercado;

NP = Número total de pneus do veículo e do equipamento;

VP = Vida útil total do pneu, em quilômetros, incluindo-se as recauchutagens ou recapagens. Obtido através de pesquisa de mercado.

2.4.2.7 Custo variável total (CV)

O custo variável total é obtido pela soma das seis parcelas anteriormente definidas.

$$CV = PM + DC + AD + LB + LG + PR \quad (14)$$

2.4.3 Custo total

Por fim, o custo total de operação do veículo é dado pela soma do custo variável total (CV) com a divisão do custo fixo mensal (CF) pela distância mensal percorrida pelo veículo.

$$CT = CV + \frac{CF}{DM} \quad (15)$$

onde:

CV = Custo variável total;

CF = Custo fixo mensal;

DM = Distância mensal percorrida pelo veículo.

2.5 Problema de roteirização de veículos

”O termo roteirização pode ser definido como o processo de determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de nós geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento.” (PAULA, 2009)

Esta seção pretende fazer um estudo sobre os Problemas de Roteirização de Veículos, onde são abordados conceitos, características, formulações, classificações e aplicações. Começando pelo problema básico de roteirização e avançando para os problemas clássicos.

2.5.1 Problema básico de roteirização de veículo e suas extensões

CHRISTOFIDES (1985) define o problema básico de roteirização de veículos como o problema de distribuição, no qual veículos localizados em um depósito central devem ser programados

para visitar clientes geograficamente dispersos, de modo a atender a suas demandas conhecidas. As restrições mais usuais do problema estão relacionadas às capacidades dos veículos.

Tendo em vista o grande número de situações práticas que dão origem aos problemas de roteirização de veículos, (CHRISTOFIDES, 1985) apresenta o problema básico de roteirização de veículos e o descreve como a essência de todos os problemas de roteirização de veículos.

De acordo com BELFIORE (2006), os problemas de roteirizações de veículos podem ser classificados em diversas categorias e tipos. Os vários problemas diferem entre si em aspectos relacionados ao tipo de operação, ao tipo de carga, ao tipo de frota utilizada, à localização dos clientes, aos tipos de restrições, ao tipo de função objetivo e vários outros fatores.

Segundo SILVA (2007) o problema básico de roteirização ignora um grande número de parâmetros, que são frequentemente encontrados em situações reais.

BELFIORE (2006) classifica os principais parâmetros que caracterizam um problema de roteirização em categorias, o autor obteve estes parâmetros dos trabalhos de CHRISTOFIDES (1985), BODIN; GOLDEN (1981.), BODIN et al. (1983), ASSAD (1988), RONEN (1988) e BREJON (1999). A seguir são apresentadas os parâmetros de duas destas categorias que foram relevantes para a delimitação do problema proposto pelo presente trabalho.

A primeira categoria é representada pelas restrições do problema, estas estão descritas a seguir:

Restrições dos veículos

- limite de capacidade dos veículos;
- limite com relação ao tipo de carga dos veículos;
- operação de carga e descarga dos veículos;
- número e tipo de veículo disponíveis.

Restrições junto aos clientes

- janela de tempo dos clientes;
- atendimento total ou parcial das demandas;
- tempo máximo permitido para carga e descarga;
- disponibilidade de área para estacionamento do veículo.

Restrições das rotas

- horário de início e término das viagens;

- tempo máximo de viagem de um veículo;
- distância máxima percorrida;
- locais de parada fixas.

A segunda categoria é representada pelas hipóteses e características do problema, estas estão descritas a seguir:

Tipo de operação

- coleta;
- entrega;
- coleta e entrega simultaneamente;
- coleta (ou entrega) com carga de retorno.

Tipo de carga

- única ou carga de lotação;
- múltiplas cargas ou carga fracionada.

Tipo de demanda

- determinística;
- estocástica.

Localização da demanda

- demanda localizada somente em arcos;
- demanda localizada somente em nós;
- demanda localizada em arco e nós.

Tamanho da frota

- limitada;
- ilimitada.

Tipo da frota

- homogênea;
- heterogênea.

Depósito e localização de veículos

- um único depósito;
- vários depósitos;
- quantidade de produtos disponíveis no depósito central para entrega aos clientes;
- número de bases de origem e destino dos veículos.

Jornada de trabalho

- duração;
- horário de almoço e outras interrupções;
- permissão para viagem com mais de um dia de duração;
- número de tripulantes por veículo.

Estrutura da rede

- direcionada;
- não direcionada;
- mista.

Outras hipóteses

- cada veículo pode visitar um cliente uma única vez durante a rota;
- um cliente pertence a uma única rota;
- um cliente pode pertencer a mais de uma rota;
- quando o veículo visita um cliente da rota todos os clientes são visitados, etc.

2.5.2 Classificação dos problemas de roteirização

De acordo com SILVA (2007), uma das dificuldades de se modelar e resolver um problema de roteirização advém da grande quantidade de parâmetros que podem influenciar esse tipo de problema. Uma adequada classificação, identificando os aspectos mais relevantes permite que seja implementada uma estratégia de solução adequada.

Diversos autores apresentam classificações para os problemas de roteirização, o presente trabalho aborda quatro das principais classificações encontradas na literatura, segundo BODIN et al. (1983) e RONEN (1988).

Segundo BODIN et al. (1983), os problemas de roteirização podem ser classificados em função de parâmetros espaciais e/ou temporais, sendo divididos em três classes apresentadas a seguir:

2.5.2.1 Problemas de roteirização de veículos

Problemas sem restrições temporais por parte dos horários de atendimento dos clientes, e sem relações de precedência entre os mesmos, ou seja, nenhum cliente precisa ser atendido especificamente antes ou depois de outro. Num problema desse tipo apenas os aspectos espaciais são levados em consideração e o objetivo é construir um conjunto de rotas viáveis minimizando os custos.

2.5.2.2 Problemas de programação de veículos

Problemas em que a definição das rotas leva em conta restrições temporais, com horários pré-estabelecidos para cada atividade a ser executada. Como exemplo de restrições temos o horário para chegada e saída dos pontos de demanda, o horário de saída do depósito, a parada para reabastecimento, dentre outros. Nesse tipo de problema, além dos aspectos espaciais, os aspectos temporais são importantes. Problemas de programação de veículos e tripulações são encontrados no transporte aéreo, ferroviário, por ônibus, dentre outros;

2.5.2.3 Problemas combinados de roteirização e programação de veículos

Problemas em que existem algum tipo de restrição de precedência e ou janela de tempo. Relações de precedência ocorrem, por exemplo, quando a entrega de uma mercadoria deve ser precedida pela sua coleta. Janelas de tempo são restrições horárias normalmente associadas ao intervalo desejado para que um dado serviço seja executado num cliente. Podem existir outros tipos de janela de tempo, como, por exemplo, o intervalo de tempo que um veículo fica disponível, ou o intervalo de tempo em que o depósito(s) fica disponível ao(s) veículo(s). Em problemas combinados tanto os aspectos espaciais quanto temporais são levados em

consideração, este tipo de problema predomina na prática.

RONEN (1988) divide os problemas de roteirização em função do ambiente operacional e do objetivo:

2.5.2.4 Problemas relativos ao transporte de passageiros

Problemas que envolvem o transporte de passageiros, tais como, programação de linhas de ônibus; de sistemas de táxi; de sistemas de transporte de pessoas, em geral idosos e deficientes, conhecidos como "*dial-a-ride*"; de transporte de escolares por ônibus, entre outros;

2.5.2.5 Problemas de prestação de serviços

Problemas que envolvem a prestação de serviços, tais como, roteirização e programação de equipes de reparos ou de serviços públicos, tais como de coleta de lixo, entrega postal, varrição de ruas e leitura de parquímetros, entre outros;

2.5.2.6 Problemas relativos ao transporte de carga - coleta e distribuição

Problemas que envolvem o transporte de carga, RONEN (1988) estabelece doze critérios de classificação para este tipo de problema:

1. Tamanho da frota;
2. Composição da frota;
3. Estrutura de custos da frota;
4. Componentes de custo da frota;
5. Número de bases de origem e destino dos veículos;
6. Natureza da demanda;
7. Tipo de operação;
8. Número de viagens por veículo num determinado período;
9. Duração ou tempo máximo permitido de viagem;
10. Tipo de entrega;
11. Distâncias e tempos de viagens;
12. Função e objetivos do modelo.

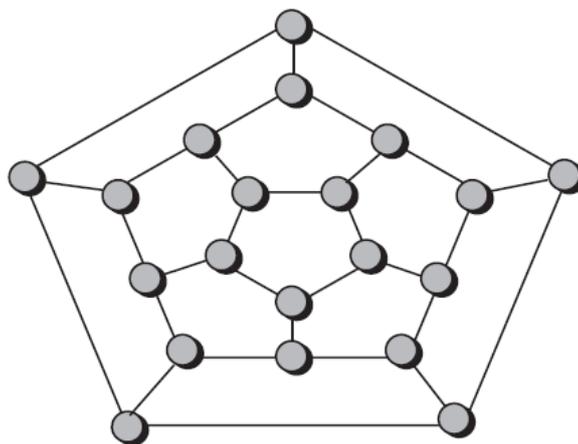
2.5.3 Problemas clássicos de roteirização

Este tópico aborda os problemas clássicos de roteirização de veículos, a partir das definições de diversos autores, e enquadra o problema abordado pelo presente trabalho nestas classificações.

2.5.3.1 Problema do caixeiro viajante (*Traveling salesman problem - TSP*)

De acordo com GOLDBARG; LUNA (2005), em 1857, Willian Rowan Hamilton propôs um jogo que denominou *Around the World*. O jogo era feito sobre um dodecaedro em que cada vértice estava associado a uma cidade importante na época. O desafio consistia em encontrar uma rota através dos vértices do dodecaedro que iniciasse e terminasse em uma mesma cidade sem nunca repetir uma visita. O grafo do problema é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Modelagem do jogo de Hamilton



Fonte: GOLDBARG; LUNA (2005)

Segundo o mesmo autor, uma solução do jogo de Hamilton passou a se denominar um ciclo hamiltoniano, o problema do caixeiro viajante (*TSP*) é um problema de otimização associado ao da determinação dos ciclos Hamiltonianos em um grafo qualquer.

Existem diversas formulações para este problema, DANTZIG; FULKERSON; JOHNSON (1954) apresentam a seguinte formulação para o *TSP*:

Minimizar

$$z = \sum_n^{j=1} \sum_n^{i=1} c_{ij} x_{ij} \quad (16)$$

Sujeito a:

$$z = \sum_n^{i=1} x_{ij} = 1 \forall j \in N \quad (17)$$

$$z = \sum_n^{j=1} x_{ij} = 1 \forall i \in N \quad (18)$$

$$z = \sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \forall S \subset N \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \forall i, j \in N \quad (20)$$

O *TSP*, de acordo com CORDENONSI (2008), possui aplicação direta em situações reais que exijam o roteamento de veículos, a fabricação de placas de circuitos eletrônicos e o sequenciamento de tarefas.

2.5.3.2 Problema de múltiplos caixeiros viajantes (*Multiple traveling salesman problem - MTSP*)

Segundo BELFIORE (2006), o problema de múltiplos caixeiros viajantes (*MTSP*) é uma extensão do problema do caixeiro viajante, porém, ao invés de um único roteiro, determinam-se múltiplos roteiros com menor custo possível, de forma que cada caixeiro viajante deve visitar pelo menos um nó da rede, e cada nó deve ser visitado uma única vez. O problema é baseado em um único depósito e o veículo deve sair e retornar à mesma base.

”O *MTSP* consiste em determinar uma rota para um conjunto de caixeiros, que devem partir e voltar a um depósito específico, de tal maneira que todas as cidades intermediárias sejam visitadas apenas uma vez e por apenas um caixeiro e que o custo total destas rotas seja minimizado, sendo que o custo pode ser, por exemplo, a distância percorrida, o tempo empregado, ou outra grandeza que se queira minimizar. O *MTSP* é um problema que pode ser facilmente relacionado a aplicações de mundo real como sequenciamento de tarefas, otimização de operações logísticas, otimização de produção e muitas outras.” (MASUTTI; CASTRO, 2007)

2.5.3.3 Problema do carteiro chinês (*Chinese postman problem - CPP*)

De acordo com BELFIORE (2006), o Problema do Carteiro Chinês (*CPP*) é uma variação do problema do caixeiro viajante, porém, ao invés de nós, os clientes estão localizados em arcos.

O problema consistem em determinar um único roteiro com menor custo possível que permita ao carteiro chinês (veículo) visitar todos os arcos (clientes) de uma única vez. O problema é baseado em um único depósito e o veículo deve sair e retornar à mesma base.

Segundo BURIN (2011), o *CPP* está relacionado com a determinação de caminhos e circuitos Euclidianos de um grafo, ou seja, dado um Grafo $G = (V, E)$, onde V é um conjunto de vértices e E é um conjunto de arestas, o objetivo é encontrar um circuito de custo mínimo, que passe pelo menos uma vez por cada aresta de G .

2.5.3.4 Problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos (*Multidepot vehicle routing problem - MDVRP*)

De acordo com BURIN (2011) *MDVRP* é uma generalização do *VRP* contendo mais de um depósito. Caracteriza-se pelo veículo sair de um determinado depósito efetuar sua rota e retornar para qualquer um dos depósitos contidos no processo, trabalhando com a restrição do limite de capacidade do veículo, além da demanda que é determinística.

Já para MASUTTI; CASTRO (2007), o *MDVRP* consiste em determinar uma rota para um conjunto de m caixeiros, que devem partir e voltar a um depósito específico, de tal maneira que todas as cidades intermediárias sejam visitadas apenas uma vez e por apenas um caixeiro e que o custo total destas rotas seja minimizado, sendo que o custo pode ser, por exemplo, a distância percorrida, o tempo empregado, ou outra grandeza que se queira minimizar. O *MDVRP* é um problema que pode ser facilmente relacionado a aplicações de mundo real como sequenciamento de tarefas, otimização de operações logísticas, otimização de produção e muitas outras.

2.5.3.5 Problema de roteirização de veículos com demanda em arcos (*Capacitated arc routing problem - CARP*)

BELFIORE (2006) define o *CARP* como uma extensão do problema do carteiro chinês, acrescentando-se a restrição da capacidade de veículos, e é também uma variação do problema clássico de roteirização de veículos, no qual os clientes estão localizados em arcos ao invés de nós.

2.5.3.6 Problema de roteirização de veículos com demanda estocástica (*Stochastic vehicle routing problem - SVRP*)

Segundo SILVA (2007), o problema é uma variação do clássico de roteirização de veículos, em que a demanda passa a ser estocástica ao invés de determinística, como ocorre nos demais problemas.

2.5.3.7 Problema de roteirização de veículos com entregas fracionadas (*Vehicle routing problem with split deliveries - VRPSD*)

De acordo com BURIN (2011), o *VRPSD* é uma generalização do *VRP*, porém, neste problema os clientes podem ter sua demanda maior que a capacidade dos veículos, podendo receber diversas entregas provindas de diversos veículos.

2.5.3.8 Problema de roteirização de veículos com frota heterogênea fixa (*Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem - HFFVRP*)

SILVA (2007) define o problema de roteirização de veículos com frota heterogênea como uma variável do problema clássico de roteirização de veículos, no qual, ao invés de homogênea, a frota de veículos é heterogênea. Neste problema, o número de veículos de cada tipo é limitado (fixo). O objetivo é minimizar a soma dos custos fixos e dos custos variáveis que podem ser dependentes ou não do tipo de veículo.

2.5.3.9 Problema de roteirização e programação de veículos com janelas de tempo (*Vehicle routing, and scheduling, problem with time windows - VRSPTW*)

O problema de roteirização e programação de veículos com janela de tempo é uma generalização do problema clássico de roteirização de veículos, adicionando restrições de janela de tempo (BELFIORE, 2006), neste problema são definidos intervalos de tempo invioláveis para a entrega ao cliente (janela de tempo rígida).

Além deste problema, BELFIORE (2006) cita o problema de roteirização de veículos com janela de tempo flexível, que é semelhante ao problema anterior, porém as janelas de tempo podem ser violadas mediante o pagamento de penalidade.

3 Materiais e método

Neste capítulo é proposto os materiais e métodos para a resolução do problema do presente trabalho. Primeiramente é feita a caracterização do problema, descrevendo suas características, em seguida é explanado o modelo proposto para a resolução, e por fim são descritas a ferramenta utilizada e o processo de obtenção dos resultados.

3.1 Caracterização do problema

Esta seção pretende caracterizar o problema abordado pelo presente trabalho, por meio da abordagem das principais características da sua área de estudo, da apresentação da sua malha viária e da descrição dos fatores utilizados para a escolha do veículo de projeto.

3.1.1 Área de estudo

A área de estudo está situada no Estado de Santa Catarina, contemplando, de acordo com a divisão político-administrativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as mesorregiões Norte, Vale do Itajaí, Grande Florianópolis e Sul. A Figura 13 mostra a localização da área de estudo.

A delimitação da área de estudo para o presente trabalho considerou como critério a relevância desta área em Santa Catarina. Esta importância se comprova com os aspectos econômicos e populacionais apresentados a seguir.

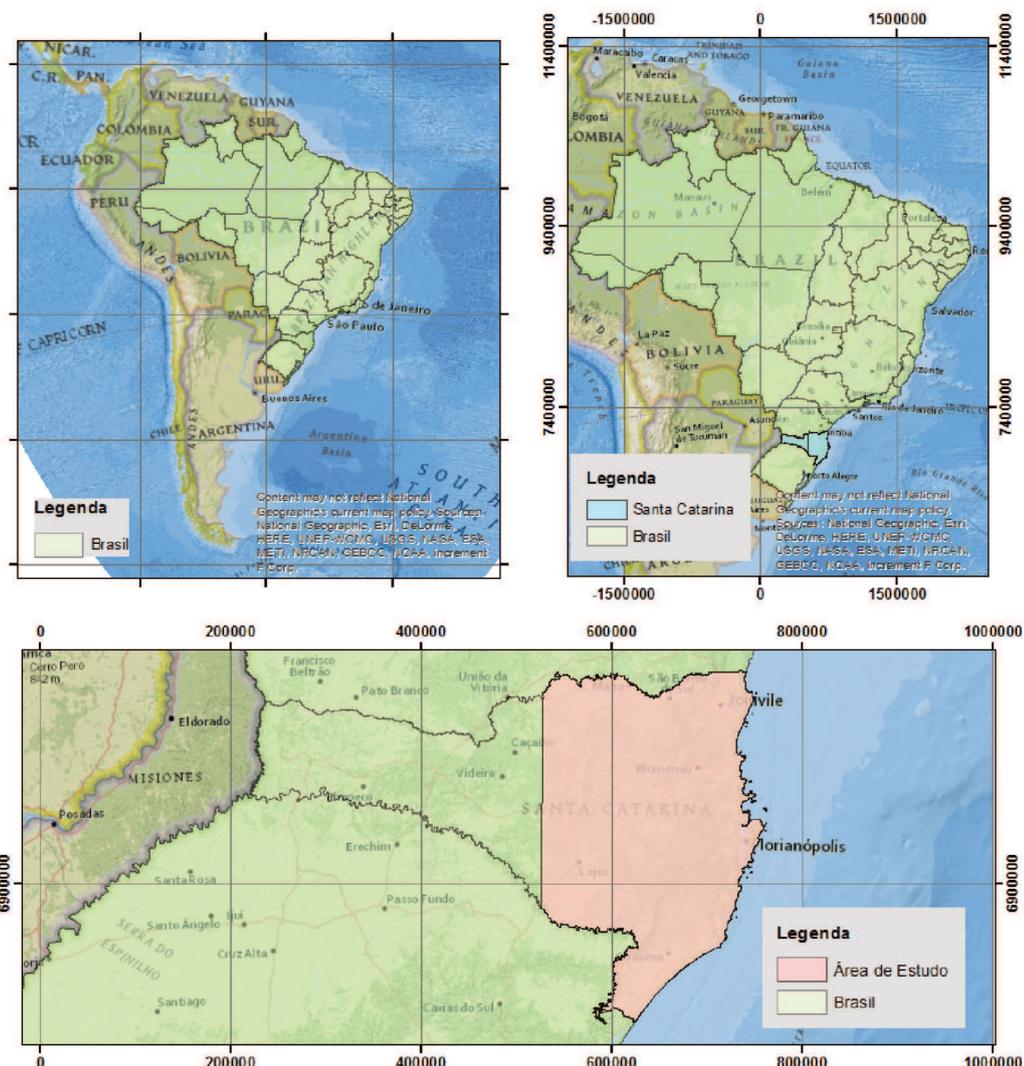
3.1.1.1 Aspectos econômicos

De acordo com FIESC (2015), a economia industrial de Santa Catarina é caracterizada pela concentração em diversos polos. Dentro da área de estudo, se destacam a produção de cerâmica, carvão, vestuário e descartáveis plásticos no Sul, a produção têxtil, naval e de cristais no Vale do Itajaí, a indústria metalúrgica, de máquinas e equipamentos, de materiais elétricos, autopeças, plástico, confecções e mobiliário no Norte e polos tecnológicos na Grande Florianópolis, Blumenau, Criciúma e Joinville.

Ainda segundo FIESC (2015), a área de estudo possui uma forte estrutura portuária, por onde escoam grande parte da produção. Esta estrutura contempla os portos de Itajaí, São Francisco do Sul, Imbituba, Navegantes e Itapoá.

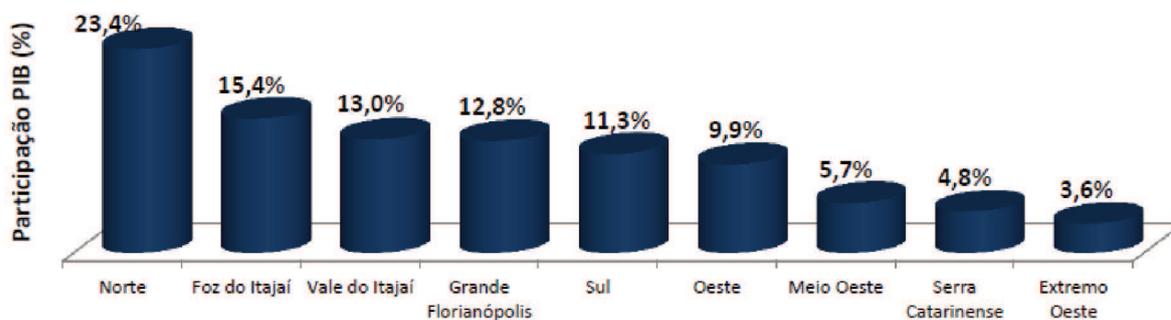
SEBRAE (2013) destaca além do setor produtivo, o turismo como uma importante fonte econômica para as regiões englobadas pela área de estudo, tendo como atrativos, as paisagens litorâneas, os complexos termominerais, turismo rural, religioso e um calendário de eventos e festas culturais.

Figura 13: Localização da área de estudo



Segundo o estudo SEBRAE (2013), mostrado na Figura 14, a área de estudo apresenta participação de 75,9% do PIB de Santa Catarina, o que comprova sua importância na economia do Estado.

Figura 14: Participação relativa das macrorregiões no PIB de Santa Catarina



Fonte: SEBRAE (2013)

3.1.1.2 Aspectos populacionais

De acordo com o IBGE <<http://www.ibge.gov.br/>>, em 2010, a população de Santa Catarina alcançou 6.248.436 habitantes, o equivalente a 3,3% da população do País. Grande parte destas pessoas se concentram na região abrangida pela área de estudo, 74,1% segundo dados do SEBRAE (2013), mostrados na Figura 15.

Figura 15: População relativa das macrorregiões de Santa Catarina



Fonte: SEBRAE (2013)

3.1.2 Rodovias

Outros importantes elementos da área de estudo são as rodovias, cuja nomenclatura está enunciada na seção 2.1.1. A área de estudos do presente trabalho contém rodovias representadas pela Figura 16 e citadas a seguir:

Rodovias Radiais

Os dados levantados não possuem rodovias radiais.

Rodovias Longitudinais

Rodovias Federais: BR-101, BR-116

Rodovias Estaduais: SC-100, SC-108, SC-110, SC-112, SC-114

Rodovias Transversais

Rodovias Federais: BR-280, BR-282, BR-285

Rodovias Estaduais: SC-281, SC-285, SC-290

Rodovias Diagonais

Rodovias Federais: não possui

Rodovias Estaduais: SC-340, SC-350, SC-370, SC-390

Rodovias de Ligação

Rodovias Federais: BR-470, BR-475, BR-477, BR-486

Rodovias Estaduais: SC-400, SC-401, SC-402, SC-403, SC-404, SC-405, SC-406, SC-407, SC-408, SC-410, SC-412, SC-414, SC-415, SC-416, SC-417, SC-418, SC-421, SC-427, SC-434, SC-435, SC-436, SC-437, SC-441, SC-443, SC-445, SC-446, SC-447, SC-449, SC-477, SC-486.

3.1.3 Veículo

De acordo com CONAB (2016), os caminhões que executam a distribuição de produtos destinam-se, principalmente, à realização de operações de média e longa distância entre centros urbanos.

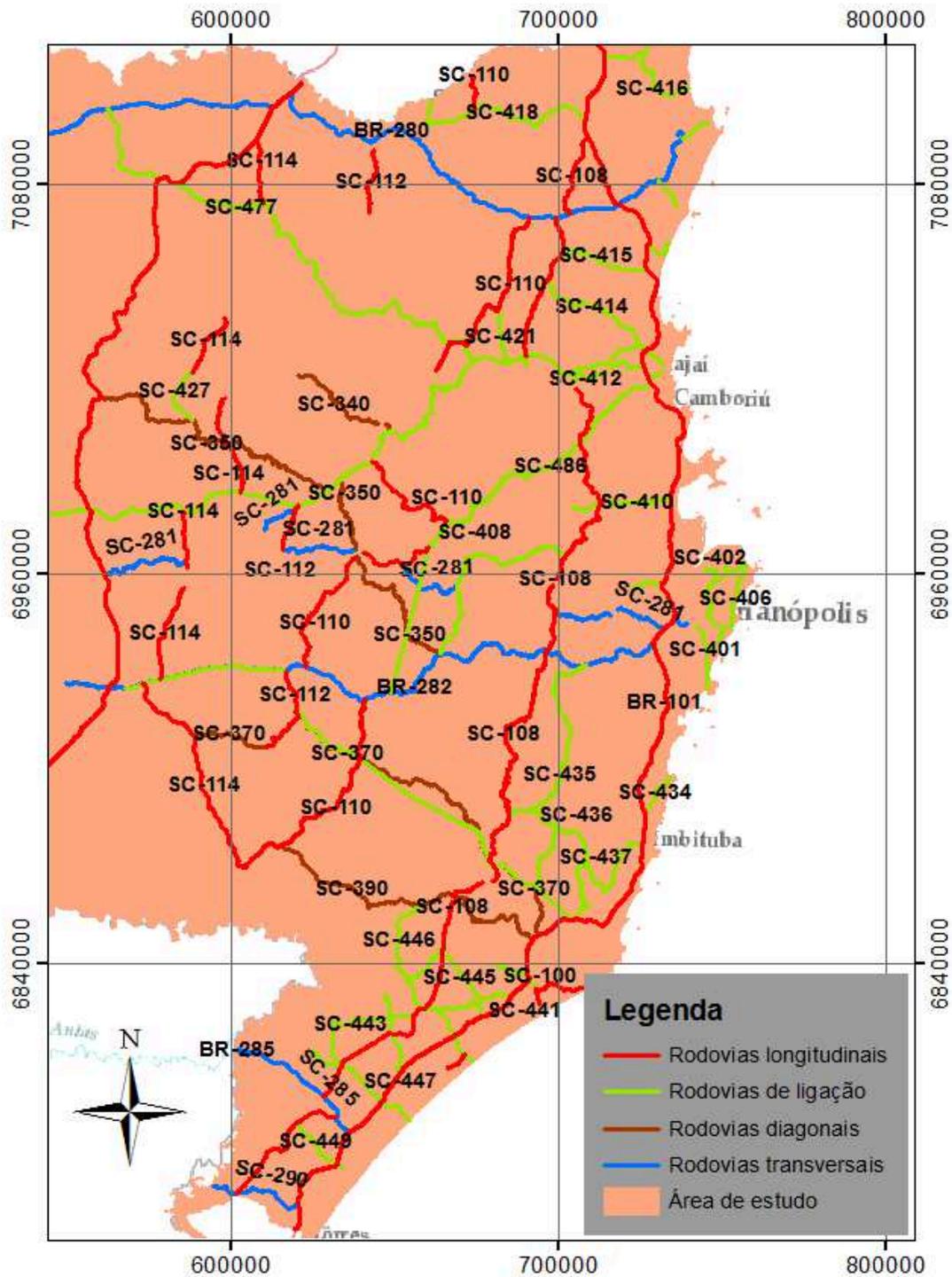
Concomitantemente, por ter que transitar em áreas urbanas, como também acessar regiões mais restritas à carreta e ao bitrem, os veículos mais adequados a distribuição são aqueles que apresentam menores dimensões, pois possibilitam maior agilidade e flexibilidade de operacionalização (CONAB, 2016). Tendo em vista estes fatores, adotou-se um caminhão simples, representado pela classe C, segundo DNIT (2006).

Em decorrência das distâncias mais longas a serem percorridas pelo veículo, sua capacidade de carga deve ser a maior possível, de modo a assegurar uma diminuição do custo fixo por quilômetro e, conseqüentemente a redução de custos operacionais totais. Portanto, optou-se pela escolha do veículo com maior capacidade dentro da classe C, o 3C (caminhão simples com 3 eixos), mostrado na Figura 17.

Segundo dados do registro nacional de transporte rodoviário de cargas da ANTT <<http://rntrc.antt.gov.br/>>, mostrados na Figura 18, o caminhão simples que apresenta a maior disponibilidade no número de veículos no país é o caminhão do tipo *truck* ou semi-pesado (de acordo com a classificação do CONTRAN), com peso bruto total de 23 toneladas e capacidade de carga de 16 toneladas.

A escolha do modelo do veículo levou em consideração a disponibilidade de veículos de carga no mercado de transporte rodoviário, visto que a uma maior disponibilidade está associado a um valor de revenda superior em comparação aos outros modelos. A Figura 19 mostra os dados de mercado disponibilizados pela Fenabreve <www.fenabreve.org.br/> contendo os modelos mais emplacados e acumulados até outubro de 2016.

Figura 16: Classificação das rodovias presentes nos dados levantados



3.1.4 Classificação e descrição do problema de roteirização

Segundo CUNHA (2000), o interesse e a demanda pela aplicação de modelos de roteirização para problema reais, através de *software* comerciais disponíveis no mercado, têm crescido muito nos últimos anos.

Figura 17: Especificações do veículo 3C

	3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO	3C
			E1 = ES, RS, CM = 6t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t d12 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	

Fonte: DNIT (2006)

Figura 18: Tipo de veículo por segmento transportado

Tipo de Veículo	Autônomo	Empresa	Cooperativa	Total
CAMINHÃO LEVE (3,5T A 7,99T)	106.261	55.885	1.007	163.153
CAMINHÃO SIMPLES (8T A 29T)	324.514	243.504	3.701	571.719
CAMINHÃO TRATOR	135.348	314.096	7.343	456.787
CAMINHÃO TRATOR ESPECIAL	779	2.353	57	3.189
CAMINHONETE / FURGÃO (1,5T A 3,49T)	65.769	31.863	297	97.929
REBOQUE	9.390	30.152	233	39.775
SEMI-REBOQUE	114.929	464.940	8.717	588.586
SEMI-REBOQUE COM 5ª RODA / BITREM	419	1.564	76	2.059
SEMI-REBOQUE ESPECIAL	154	1.330	18	1.502
UTILITÁRIO LEVE (0,5T A 1,49T)	26.435	11.998	166	38.599
VEÍCULO OPERACIONAL DE APOIO	1.014	1.603	8	2.625
Total	785.012	1.159.288	21.623	1.965.923

Atualizado em: 02/11/2016 às 05:30:00

Fonte: DNIT (2006)

Figura 19: Modelos de caminhões mais emplacados / Categoria semipesados

Semi-Pesado

Modelo	2016 Set	2016 Out		2016 Acumulado	Part.
1º VW/24.280	208	199	▼	2.078	17,20%
2º M.BENZ/ATEGO 2426	72	58	▼	795	6,58%
3º VOLVO/VM 270	72	46	▼	779	6,45%
4º FORD/CARGO 2429	79	73	▼	762	6,31%
5º M.BENZ/ATRON 2324	75	76	▲	743	6,15%
6º M.BENZ/ATEGO 2430	69	57	▼	659	5,46%
7º M.BENZ/ATEGO 1719	166	68	▼	607	5,03%
8º VW/15.190	47	29	▼	512	4,24%
9º VW/17.190	48	42	▼	502	4,16%
10º FORD/CARGO 2629	83	28	▼	458	3,79%
Total	1.293	1.055	▼	12.078	100%

Fonte: Fenabrave

Devido a esta variedade de pacotes computacionais, a classificação e a descrição são importantes para a delimitação de um PRV, visando a escolha de um *software* adequado à resolução do problema.

BODIN et al. (1983) classifica o problema proposto pelo presente trabalho como um problema combinado de roteirização e programação de veículos, pois tanto aspectos espaciais quanto temporais são levados em consideração. Já RONEN (1988) classifica como problema relativo ao transporte de carga, mais especificamente a operação de distribuição.

O presente PRV é descrito segundo as duas categorias enunciadas pela seção 2.5.1 (restrições e hipóteses). A seguir são apresentados os parâmetros contidos nestas categorias:

Restrições do problema

- Restrições dos veículos
 - a capacidade dos veículos é de 16 toneladas;
 - limite com relação ao tipo de carga dos veículos;
 - operação de carga e descarga dos veículos;
 - número e tipo de veículo disponíveis.
- Restrições junto aos clientes
 - os clientes possuem janelas de tempo;
 - cada cliente é atendido por apenas um veículo;
 - os clientes possuem um tempo descarga.
- Restrições das rotas: horário de início e horário máximo término fixos, respeitando a janela de tempo do depósito;

Hipóteses e características do problema

- Tipo de operação: entrega;
- Tipo de carga: fracionada;
- Tipo de demanda: determinística;
- Localização da demanda: demanda localizada somente em nós;
- Tamanho da frota: limitada;
- Tipo da frota: homogênea;

- Depósito e localização de veículos: um único depósito no qual representa o ponto de partida e chegada de todos os veículos;
- Jornada de trabalho: um trabalhador por veículo e não é permitida a viagem com mais de um dia de duração;
- Estrutura da rede: não direcionada;
- Outras hipóteses: cada veículo pode visitar um cliente uma única vez durante a rota.

3.2 Construção do modelo

A modelagem do problema tem como objetivo a gerar os dados para o presente trabalho, este processo é dividido em modelagem da infraestrutura, da demanda e do serviço.

A modelagem da infraestrutura produz a geometria do modelo, este procedimento consiste primeiramente no levantamento de dados com fontes confiáveis e, posteriormente, na edição e na correção topológica dos dados obtidos.

Já a modelagem da demanda consiste em estabelecer os dados numéricos referentes a demanda de cada cliente, neste processo arbitrou-se um valor referente a demanda diária da empresa e distribuiu-se esta demanda para os clientes, proporcionalmente a população em que estes se encontram.

E, por fim, a modelagem do serviço tem como objetivo a descrição dos serviços da empresa, apresentando as janelas de tempo dos clientes e do depósito da empresa, assim como os tempos de serviço das operações.

3.2.1 Modelagem da infraestrutura

Esta etapa tem como objetivo a modelagem da geometria que será utilizada na análise e foi dividida em levantamento dos dados, edição dos dados levantados e correção topológica.

3.2.1.1 Levantamento de dados

Segundo SALLES (2013), na obtenção de dados georreferenciados para a modelagem da rede de transporte é necessário certificar-se que a fonte de dados é confiável (normalmente órgãos públicos) e buscar a base de dados mais recente possível.

Estes cuidados tem a finalidade de evitar ou pelo menos minimizar erros, tais como, o resultado indicar rotas fisicamente inviáveis ou apresentar distâncias e tempos super ou sub-dimensionados.

O modelo computacional utilizado pelo presente trabalho representa a rede de transporte na forma de um grafo, este modelo necessita ser alimentado por duas camadas vetoriais de

que roteirizou os veículos do problema.

Os dados levantados representam a totalidade das rodovias de Santa Catarina, porém a área de estudo se limita as regiões descritas no item 3.1.1. Portanto retirou-se do modelo as rodovias que não estão contidas nesta área.

Além de rodovias fora da área de estudo, as duas fontes possuem dados que representam a mesma rodovia, ou seja, vias com nomenclatura federal (BR) e estadual (SC). Visto que a duplicação é um problema para o método implementado pelo *software*, confrontou-se as fontes de dados do mapa do Google <<https://www.google.com.br/maps>> com as dos dados levantados, para escolha de apenas uma.

Dentro da área de estudo, as rodovias de acesso a cidades que não possuem clientes são irrelevantes, pois não ligam os nós importantes (clientes e depósito). Portanto, estas rodovias foram eliminadas, para fins de simplificação.

3.2.1.3 Verificação e correções topológicas

No SIG, a topologia expressa o relacionamento espacial entre camadas vetoriais (geometrias de ponto, linha ou área) que se conectam ou são adjacentes.

A validação da topologia está diretamente relacionada com a produção do grafo com as características necessárias para que o *software* processe os dados geográficos e consiste na verificação de todos os elementos do grafo quanto a regras de topologia, para fins de estabelecer o controle sobre os dados vetoriais produzidos durante as tarefas de edição.

A camada vetorial a ser validada é a camada de linhas, que representa a malha viária. Utilizou-se para este processo a extensão *Topology* do *software ArcGIS*, que verifica as camadas de dados separadamente. A seguir são apresentadas as regras topológicas aplicadas, segundo o manual da extensão *Topology*.

- Linhas devem possuir parte única

As linhas devem possuir apenas uma parte, caso um linha possua múltiplas partes, esta deve ser quebrada. A Figura 21 mostra linhas com múltiplas partes (em vermelho) e com parte única (em azul).

- Linhas não devem interceptar-se

Qualquer intersecção entre segmentos é um erro pois, caso uma linha seja intersectada, esta representa mais de um elemento do grafo. Portanto realizou-se a quebra das linhas nas intersecções. A Figura 22 mostra exemplos de linhas que se interceptam (intersecção em vermelho).

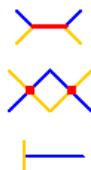
- Linhas não devem conter duplicatas

Figura 21: Exemplo de linhas com partes única e múltiplas



Fonte: (ESRI, 2008)

Figura 22: Exemplo de intersecção de linhas



Fonte: ESRI (2008)

Ao aplicar esta regra topológica no mecanismo para validação de topologia, são considerados como erros todos os segmentos que forem representados duas vezes ou mais. Portanto deletou-se uma das linhas de todos os segmentos duplicados.

- Linhas não devem conter pseudo nós

O pseudo nó surge em locais onde o segmento foi quebrado sem necessidade, a Figura 23 mostra dois exemplos de pseudos nós (pontos em vermelho), ou seja, nós desnecessários.

Esta regra topológica não é necessária para a obtenção do grafo, porém ela foi realizada para reduzir a quantidade de dados do modelo.

Figura 23: Exemplo de linhas com pseudo nó



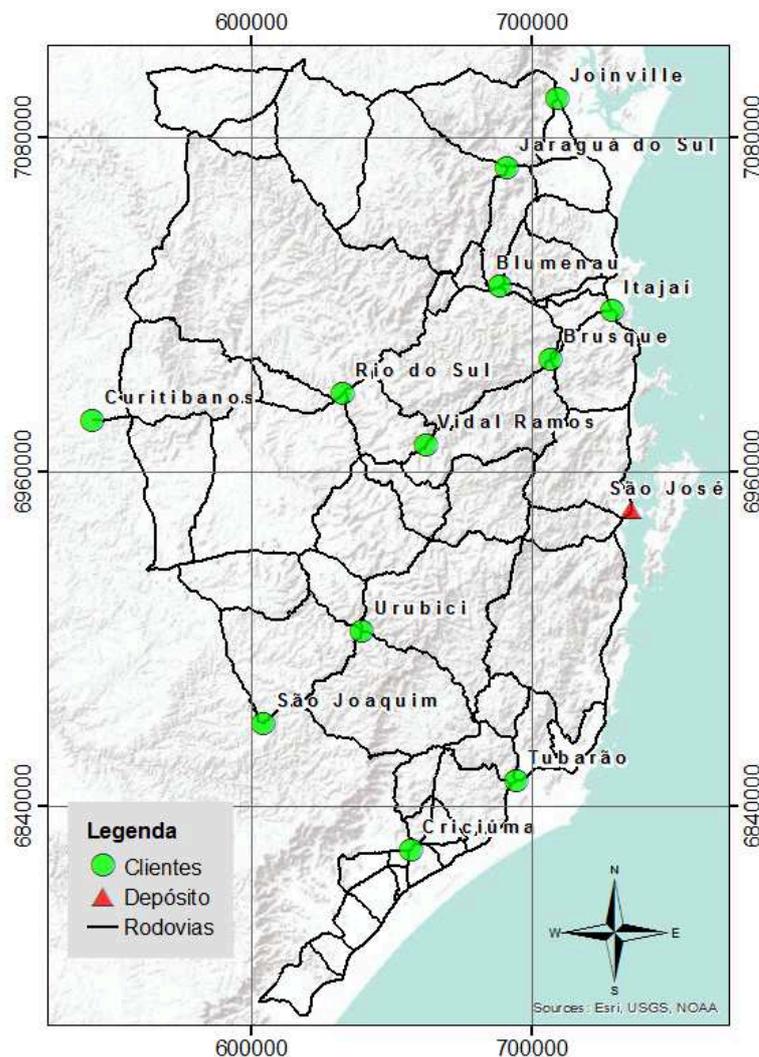
Fonte: ESRI (2008)

- Linhas não devem conter oscilações

A oscilação (*dangle*) ocorre quando a extremidade de um segmento está afastada do nó em que esta extremidade deveria estar conectada. Corrigiu-se as oscilações manualmente, ligando as extremidades aos seus devidos nós.

A Figura 24 mostra o resultado do processo de modelagem da infraestrutura, representando a distribuição dos dados dos clientes, depósito e malha viária.

Figura 24: Representação dos dados processados



3.2.2 Modelagem da demanda

Visto que o problema abordado pelo presente trabalho não possui dados reais, definiu-se demandas determinísticas para os clientes, ou seja, determinadas antecipadamente a entrega.

Estabeleceu-se arbitrariamente que a carga total que a empresa transporta em um dia é de 73 toneladas, sendo esta dividida proporcionalmente a população das cidades em que se encontram cada cliente. Os dados referentes a população foram obtidos do censo IBGE 2010 <<http://www.ibge.gov.br/>>.

Determinou-se ainda um pedido mínimo de 2 toneladas, pois um pedido menor que este seria inviável economicamente. Logo aumentou-se a demanda de alguns municípios com menor população e diminuiu-se a demanda de cidades maiores. A Tabela 2 mostra as demandas utilizadas no modelo.

Tabela 2: Demanda dos clientes

Cidade	População (IBGE 2010)	Demanda (toneladas/dia)
Vidal Ramos	6.290	2,261
Urubici	10.699	2,444
São Joaquim	24.812	3,030
Curitibanos	37.748	3,567
Rio do Sul	61.198	4,540
Tubarão	97.235	5,036
Brusque	105.503	5,379
Jaraguá do Sul	143.123	6,940
Itajaí	183.373	7,611
Criciúma	192.308	7,982
Blumenau	309.011	9,825
Joinville	515.288	14,386
Total	1.686.588	73,000

3.2.3 Modelagem do serviço

A empresa hipotética abordada pelo presente trabalho realiza a distribuição de produtos alimentícios, estando localizada no município de São José. Em função da perecibilidade e do intenso fluxo de venda dos produtos, a distribuição da empresa tem periodicidade diária.

Os clientes da empresa se encontram nas cidades de Tubarão, São Joaquim, Rio do Sul, Joinville, Jaraguá do Sul, Itajaí, Curitibanos, Criciúma, Brusque, Blumenau, Urubici e Vidal Ramos.

No problema de roteirização de veículos com janelas de tempo, para cada nó i de uma rede $G = (V,E)$ é estipulada uma janela de tempo que deve ser atendida. Assim, para um cliente A é denominada uma janela de tempo $[a_i, b_i]$, onde a_i corresponde à hora inicial de atendimento e b_i à hora final de atendimento (PAULA, 2009). Para a presente análise foram estabelecidas janelas de tempo rígidas, ou seja, os veículo não podem nem chegar antes de a_i e nem depois de b_i . A Tabela 3 mostra estas janelas de tempo.

Além dos clientes, o depósito também possui sua janela de tempo rígida, como a empresa realiza transportes em grandes distâncias, foi estabelecida uma janela de tempo que extrapola em duas horas o horário comercial, para que todos os veículos possam retornar no mesmo dia ao depósito. A Tabela 4 mostra a janela de tempo do depósito.

Um dos parâmetros que influenciam o problema de roteirização com janelas de tempo é o tempo de serviço, que representa o tempo em que um determinado veículo leva para realizar a entrega do produto para um determinado cliente. Este tempo é um parâmetro característico de cada operação da empresa, que pode variar com a eficiência dos funcionários, disponibilidade do cliente, entre outros fatores.

Tabela 3: Janelas de tempo dos clientes

Cliente	Horário inicial	Horário final
Vidal Ramos	08:00	14:00
Urubici	12:00	17:00
São Joaquim	08:00	18:00
Curitibanos	08:00	18:00
Rio do Sul	10:00	16:00
Tubarão	08:00	12:00
Brusque	08:00	12:00
Jaraguá do Sul	09:00	16:00
Itajaí	09:00	14:00
Críciuna	08:00	15:00
Blumenau	10:00	15:00
Joinville	08:00	12:00

Tabela 4: Janela de tempo do depósito

Depósito	Horário inicial	Horário final
São José	08:00	20:00

Visto que o presente problema é de caráter hipotético, ou seja, não existem dados para estimar o tempo de serviço, determinou-se 30 minutos como o tempo de serviço de todas as operações da empresa.

3.3 Emprego da ferramenta de roteirização

A ferramenta escolhida para a resolução do problema de roteirização de veículos proposta pelo presente trabalho foi uma extensão do *software ArcGIS*, o *Network Analyst Tool*, desenvolvido pela empresa *Environmental Systems Research Institute (ESRI)*.

Segundo MARTINS; LOPES (2014), o *ArcGIS* apresenta uma plataforma padrão constituída por um conjunto integrado de *softwares* para aplicações de SIG. Estes *softwares* realizam edições e análises espaciais para tomada de decisão, permitindo realizar desde aplicações básicas de SIG, até análises espaciais mais avançadas de acordo com as necessidades específicas.

De acordo com MARTINS; LOPES (2014), o *Network Analyst* permite realizar análises espaciais em redes baseadas em modelos dinâmicos reais, sendo possível criar rotas multimodais, dar indicações de viagens, procurar o ponto mais próximo, criar áreas de serviço e calcular os custos matriciais de origem-destino, considerando as restrições e limites de um modelo real.

O modelo desta ferramenta SIG permite a resolução de alguns problemas, incluindo o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo aqui abordado. Porém, outros pacotes computacionais poderiam ter sido utilizados na presente análise, tais como o TransCAD,

da Caliper ou o *software* livre Quantum GIS.

Apesar de ser útil em várias situações, o método implementado pelo *software* apresenta a restrição de exigir como parâmetro de entrada, entre outros dados, a frota de veículos, para então calcular as melhores rotas. Portanto, para uma análise englobando diversos tipos de veículos é necessário o cálculo do custo de transporte de cada veículo.

Visto o grande número de variáveis para se calcular o custo de transporte de um veículo (enunciados na seção 2.4), estabeleceu-se a utilização de apenas um tipo de veículo, ou seja, uma frota homogênea.

3.3.1 Critérios de impedância

Para a determinação das rotas otimizadas propostas pelo presente problema, foram atribuídos valores para cada elemento da geometria do modelo, estes valores representam o parâmetro a ser minimizado (impedância). Fatores como distância, velocidade e custo podem ser aplicados como critérios de impedância em problemas de roteirização.

Segundo COELHO et al. (2015), dados geométricos são parâmetros de entrada para diversos estudos na área de transporte. Alguns modelos para previsão de velocidades de operação necessitam de informações tais como o raio de curvatura e o comprimento do trecho em questão.

Uma das restrições do *software* adotado para o presente trabalho é a limitação em utilizar o tempo de percurso, como critério de impedância da rede, ou seja, a melhor rota será dada pelo percurso com menor tempo. Portanto o modelo deste pacote computacional não realiza análises com a distância ou os custos como critérios a serem minimizados.

Visto que tal tempo é definido como o comprimento do segmento dividido pela sua velocidade de operação, levantou-se os graus de curvatura horizontal (IGH) de cada rodovia do modelo, para que, posteriormente, estes IGH fossem aplicados a uma formulação teórica para obtenção das velocidades de operação.

3.3.1.1 Grau de curvatura horizontal (IGH)

O grau de curvatura horizontal de um trecho caracteriza-se pelo somatório dos raios de todas as curvas da rodovia dividido pelo seu comprimento, expresso por:

$$IGH = \frac{\sum \alpha_i}{L} \quad (21)$$

onde:

α_i = ângulo central da curva horizontal i ;

L = comprimento do segmento.

Para a determinação dos IGH do presente trabalho, adotou-se o procedimento criado

por COELHO et al. (2015), tal procedimento é uma adaptação do trabalho desenvolvido por WORRALL; NEBOT (2007). Ambos utilizam como entrada dados de GPS para determinação de parâmetros geométricos.

O algoritmo de COELHO et al. (2015) identifica sistematicamente segmentos horizontais e curvas, por meio de poligonais georreferenciadas que representam o eixo da rodovia. Posteriormente são extraídos os dados geométricos das tangentes e curvas identificadas, e aplica-se estes dados a Equação 21 para cada trecho da geometria, a fim de encontrar o IGH do trecho.

3.3.1.2 Velocidade de operação

Segundo DNER (1999), a velocidade de operação é a maior velocidade média possível numa rodovia, para um dado veículo e sob determinadas condições. De forma concordante, BRASIL (2006) estabelece que a velocidade de operação é a mais alta velocidade com que o veículo pode percorrer uma dada via atendendo às limitações impostas pelo tráfego, sob condições favoráveis de tempo, sem poder exceder a velocidade de projeto.

Para o problema proposto pelo presente trabalho, poderia-se utilizar os limites de velocidade de cada rodovia como velocidade de operação das mesmas. Porém a não existência de um banco de dados com tais informações inviabiliza esta abordagem, sendo necessário a verificação das placas de limite de velocidade de todas as rodovias do modelo.

Para solucionar este problema buscou-se na literatura uma formulação teórica, oriunda da observação das velocidades praticadas nos trechos, sendo identificados os percentis 85 (V_{85}). Seis destas formulações são apresentadas na Tabela 5, as quais utilizam como dado de entrada somente o valor do grau de curvatura horizontal do segmento, do inglês *degree of curvature (DC)*.

Tabela 5: Fórmulas para estimativa de V_{85} com base no IGH

Método	Fórmula	Referência	r^2
1	$V_{85} = 65.0 - 0.52 \times DC + 0.002 \times DC^2$	POE; JR. (1995)	0,89
2	$V_{85} = 58.656 - 1.135 \times DC$	LAMM; CHOUEIRI; MAILAENDER (1990)	0,79
3	$V_{85} = 101.2 - 2.73 \times DC$	MCLEAN (1978)	0,87
4	$V_{85} = 93.8 - 2.59 \times DC$	GLENNON; NEWMAN; LEISCH (1985)	0,84
5	$V_{85} = 96.152 - 0.302 \times DC$	LAMM; CHOUEIRI (1987)	0,79
6	$V_{85} = 94.37 - 1.83 \times DC$	LAMM et al. (1988)	0,79

Foi escolhido a formulação de LAMM; CHOUEIRI (1987) para o calculo do V_{85} por representar um estudo em rodovias rurais. Outros autores também fizeram estudos sobre a velocidade de operação em rodovias rurais, porém a formulação de LAMM; CHOUEIRI (1987)

apresenta os resultados mais realistas, visto que os valores obtidos com as outras formulações apresentaram resultados abaixo de 40 km/h.

Após a aplicação da formulação teórica para todas as rodovias, verificou-se que algumas apresentaram valores de velocidade de operação inferiores a 50 km/h e outros valores superiores a 80 km/h, o que poderia se configurar como uma falha na obtenção do IGH ou na formulação teórica da velocidade de operação da rodovia.

Com o objetivo de corrigir estas possíveis falhas, buscou-se através do mapa do Google imagens das placas de limite de velocidade para confrontar estes dados com os dados obtidos teoricamente.

3.3.2 Banco de dados geográficos do problema

Segundo o manual da ferramenta ESRI (2008), os bancos de dados geográficos (*Geodatabase*) são coleções de diferentes tipos de dados geográficos unidos em um mesmo sistema, este pode variar quanto o seu tamanho e o número de usuários que o utilizam, apenas uma pessoa ou grupos de trabalho, tais como departamentos, instituições, etc.

Também de acordo com ESRI (2008), o banco de dados geográficos da ferramenta possui uma plataforma abrangente utilizada para representar e manipular dados geográficos. Esta plataforma gera modelos divididos em classes de dados (*Feature Dataset*), estas classes representam comportamentos espaciais por meio de tabelas de atributos contendo dados numéricos.

Fisicamente os dados de um *Geodatabase* são armazenados em um sistema de gerenciamento de dados, do inglês *database management system (DBMS)*, este sistema pode ser acessado através do *software ArcGIS* ou pelo próprio *DBMS* através do *software ArcCatalog*, que utiliza a linguagem SQL (ESRI, 2010).

O *Geodatabase* do presente trabalho foi dividido em duas classes de dados, a primeira contendo os nós dos clientes e do depósito da empresa, nomeada de *Analysis*, e a segunda contendo a camada de dados que representa a malha viária da área de estudo, nomeada *Transportation*.

A ferramenta *Network Analyst* realiza suas análises em redes de dados, do inglês *Network Dataset*, estas redes necessitam de conectividade entre seus elementos (ESRI, 2010). Por este motivo foi realizado o processo de validação topológica.

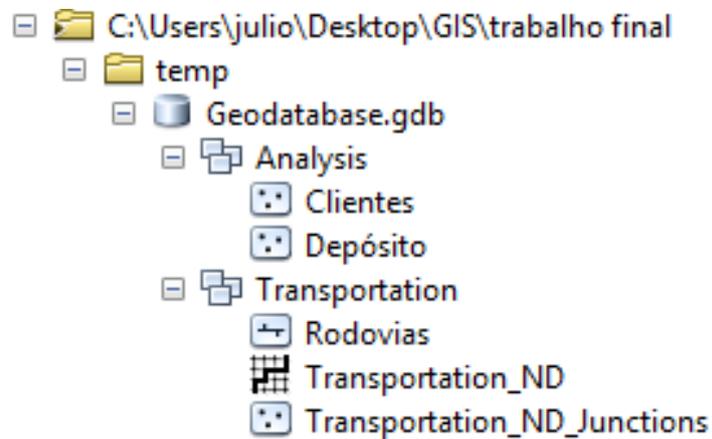
Para o presente trabalho, o *Network Dataset* foi gerado a partir da classe de dados *Transportation*, cuja conectividade se encontra nas extremidades dos segmentos.

O modelo computacional que gera o *Network Dataset* tem como produtos a rede de transporte, nomeada *Transportation_ND*, e uma camada de dados que representa os nós que ligam os elementos da rede, nomeada *Transportation_ND_Junctions*.

A Figura 25 mostra o *Geodatabase* do presente trabalho, acessado pelo *ArcCatalog*. E a Figura 26 mostra a distribuição dos dados contidos no *Geodatabase*, representados por um

grafo, não orientado, valorado, não regular, planar e incompleto, de acordo com as classificações apresentadas em 2.2.2.

Figura 25: *Geodatabase* acessado pelo *ArcCatalog*



3.3.3 Procedimento de simulação

Para o processo de simulação, utilizou-se a função *New Vehicle Routing Problem*, que soluciona problemas de roteirização de veículos repetindo janelas de tempo e utilizando múltiplos veículos. Apesar de resolver problemas com este grau de complexidade, a função utilizada respeita somente o tempo como critério de impedância. A Figura 27 mostra a barra da ferramenta e a função utilizada.

Segundo ESRI (2010), o processo de utilização da função *New Vehicle Routing Problem* consiste em 5 etapas:

1. Adicionar pedidos (clientes)

Consiste em importar os dados dos clientes a partir das classes de dados *Analysis*, realizado no botão 1 da Figura 28.

2. Adicionar depósitos

Consiste em importar os dados do depósito a partir das classes de dados *Analysis*, realizado no botão 2 da Figura 28.

3. Adicionar rotas (veículos)

Consiste no dimensionamento da frota de veículos, realizado no botão 3 da Figura 28. Este dimensionamento engloba a determinação da quantidade e da capacidade de carga dos caminhões encarregados pela execução do serviço.

Figura 26: Distribuição dos dados contidos no *Geodatabase*

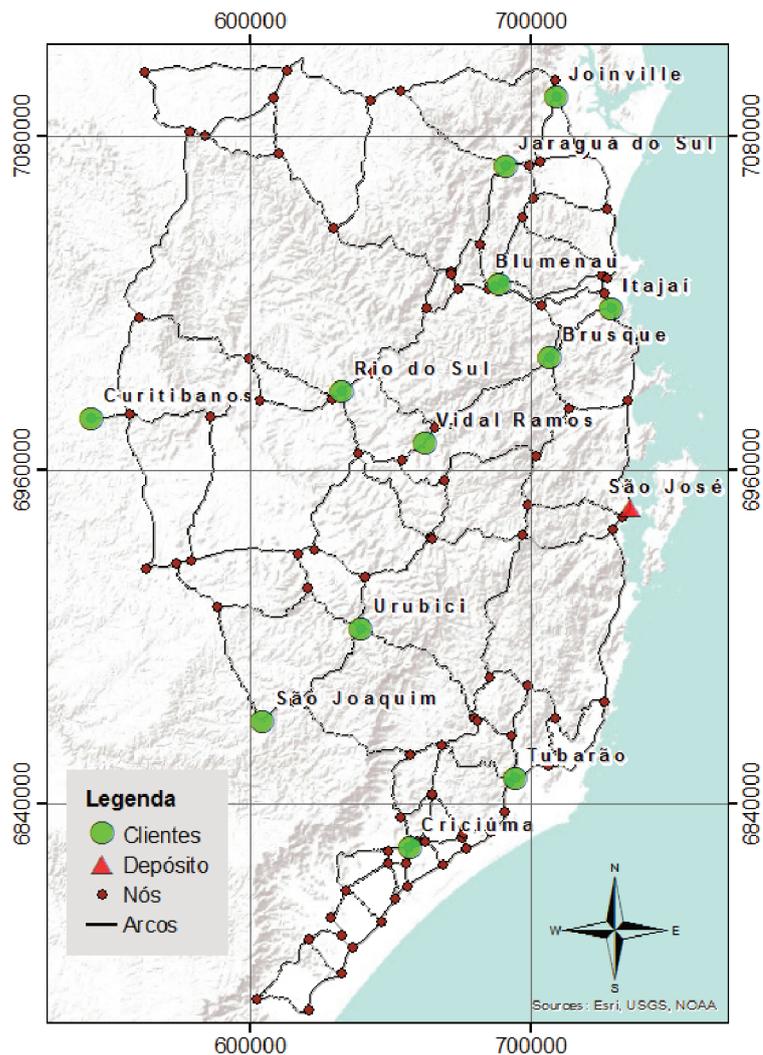
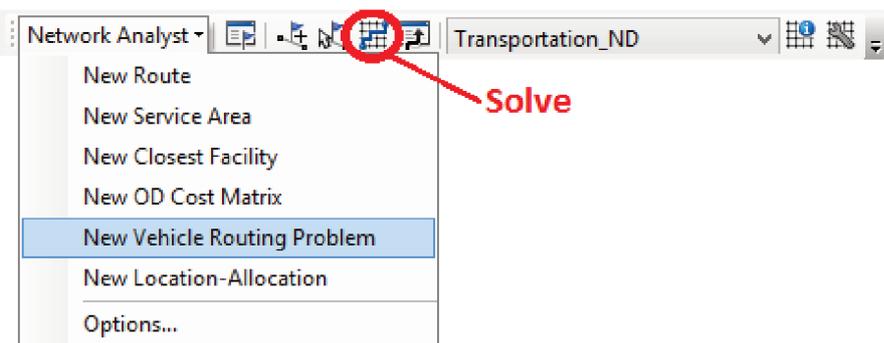
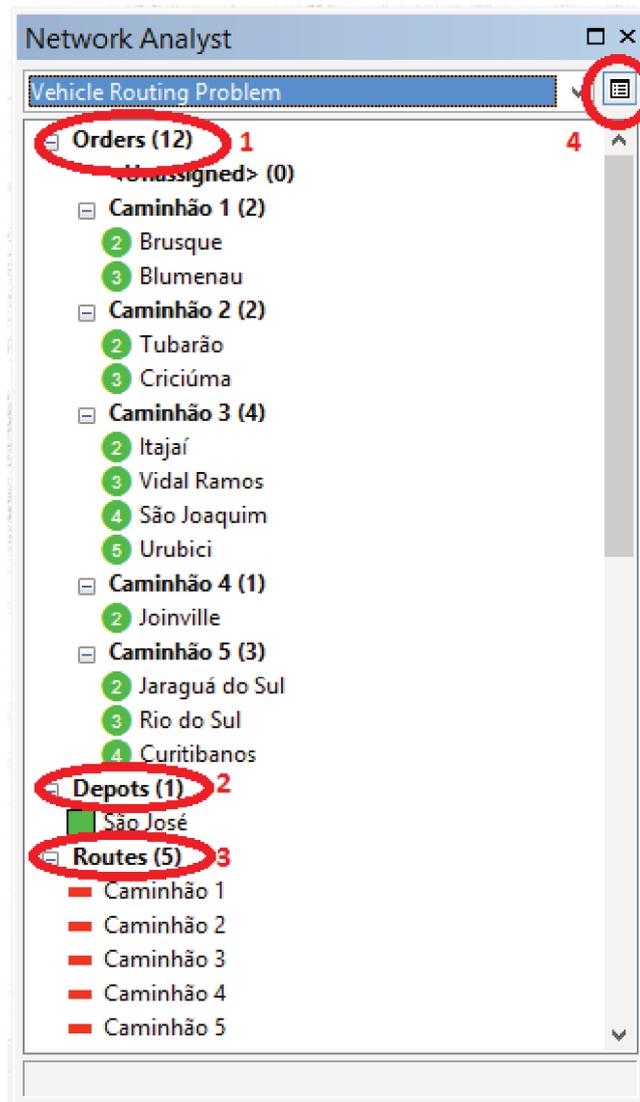


Figura 27: Barra de ferramentas do *Network Analyst*



A frota de veículo foi dimensionada com 5 caminhões de capacidade de 16 toneladas, esta quantidade foi escolhida por ser o menor número de veículos, com esta capacidade, que atenderia a demanda diária total de 73 toneladas, estabelecida na seção 3.2.2.

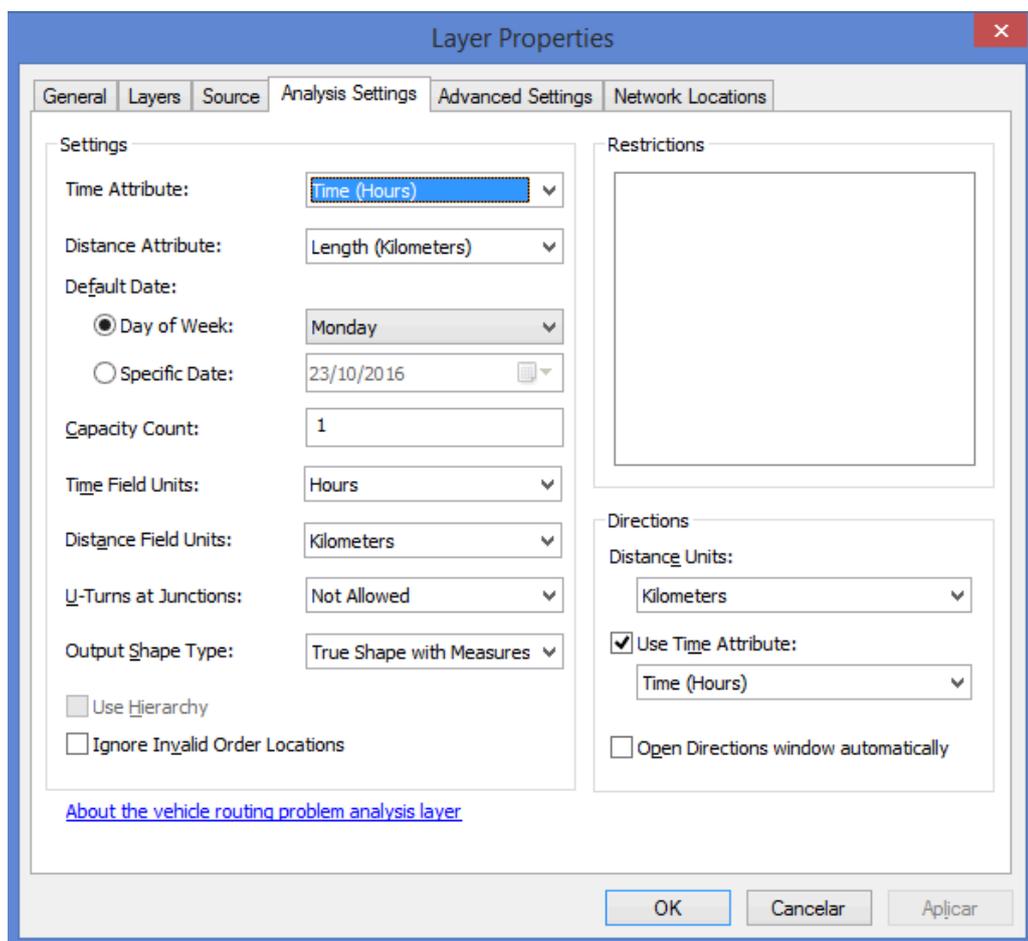
Figura 28: Janela geral do *Network Analyst*



4. Definir propriedades do problema de roteirização de veículos

Consiste em ajustar as propriedades do problema, tais como as unidades de tempo e distância dos dados de entrada, o dia da semana ou data específica em que ocorrerá a análise, esta opção é irrelevante para o presente trabalho pois seria utilizada caso existissem dados de tráfego variando com o tempo, a quantidade de unidades de medida da carga transportada (*capacity count*), para o presente problema a carga é medida somente em toneladas, a possibilidade dos caminhões realizarem retornos nas conexões (*U-turns at junctions*) e a opção de medir as distâncias reais ou em linha reta entre dois nós (*output shape type*). A Figura 29 mostra a janela de propriedades do presente trabalho, esta janela foi aberta pelo botão 4 da Figura 28.

Figura 29: Janela de propriedades do *Network Analyst*



5. Executar o modelo

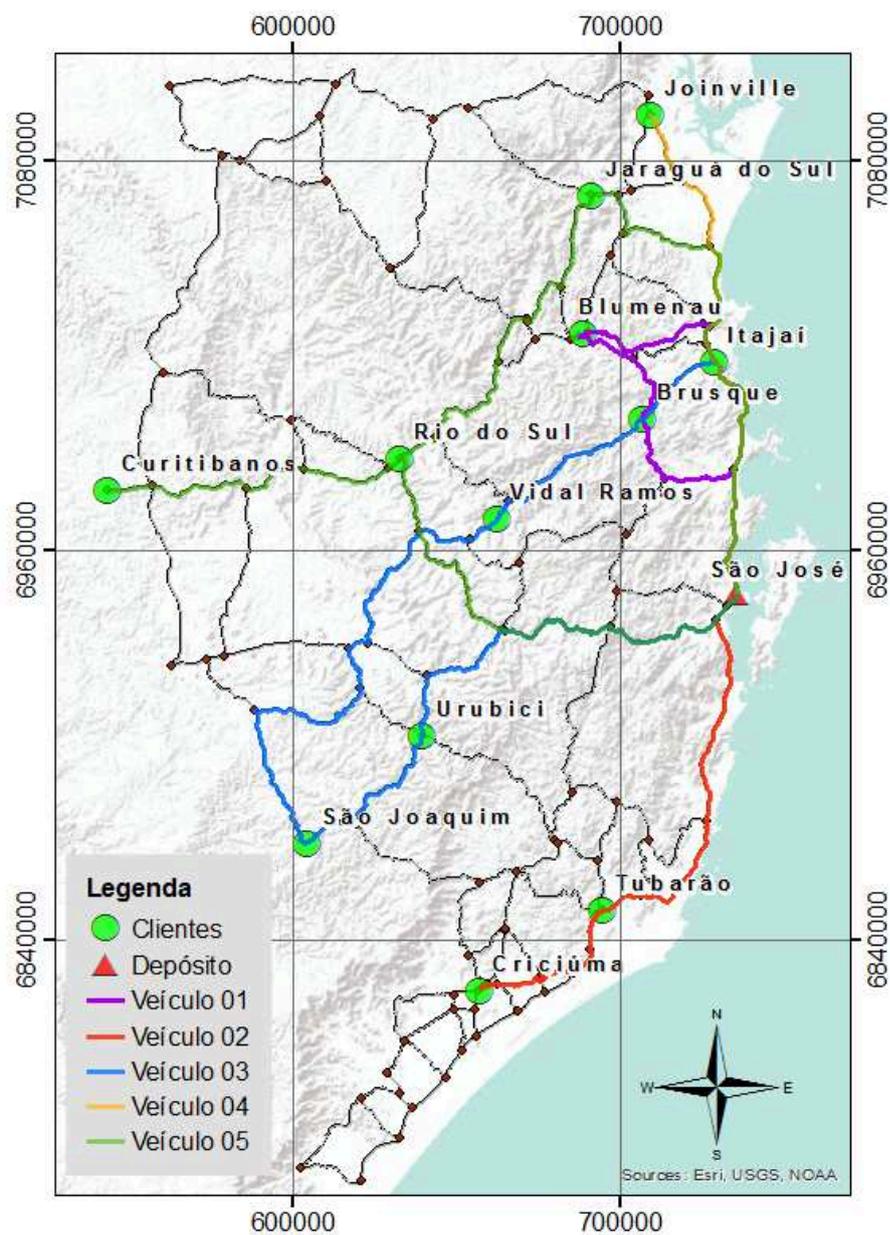
Após o inserir os dados de entrada e definir as propriedades do problema, o *software* realiza a simulação através do botão *solve* da Figura 27

4 Resultados

4.1 Soluções das roteirizações

Esta seção apresenta os resultados da simulação descrita no item 3.3.3, a Figura 30 mostra a distribuição das rotas geradas pelo *software*. As rotas desta imagem se sobrepõem porém elas serão melhor detalhadas a seguir.

Figura 30: Distribuição das rotas dos veículos



4.1.1 Veículo 01

O veículo 01 atende os clientes que se localizam nas cidades de Brusque e Blumenau, sendo que a demanda total destes clientes é de 15,204 toneladas e a distância total percorrida pelo caminhão é de 277,16 quilômetros. A Tabela 6 apresenta um resumo contendo os horários, demanda e tempo de serviço dos clientes atendidos pelo veículo 01.

Tabela 6: Tabela resumo do veículo 01

Cidade	Demanda (toneladas)	Horário inicial	Horário final	Tempo de serviço (horas)	Horário de chegada	Horário de saída
Brusque	5,379	08:00:00	12:00:00	0,5	09:13:29	09:43:29
Blumenau	9,825	10:00:00	15:00:00	0,5	10:31:25	11:01:25

A rota do veículo 01 consiste em sair do depósito, em São José, as 08:00:00, visitar as cidades de Brusque (cliente 01) e Blumenau (cliente 02), e por fim retornar ao depósito as 12:43:12, com uma ociosidade de 7 horas e 17 minutos. A Figura 31 mostra a rota do veículo 01 e a Tabela 7 apresenta a sequência observada de rodovias e cidades que o veículo percorre em sua rota.

Tabela 7: Resumo da rota do veículo 01

Rota	Distância (km)
São José	
BR-101	41,84
SC-410	23,63
SC-108	24,95
Brusque	
SC-108	24,19
SC-412	20,99
BR-470	1,89
Blumenau	
BR-470	45,30
BR-101	94,36
São José	

4.1.2 Veículo 02

O veículo 02 atende os clientes que se localizam nas cidades de Tubarão e Criciúma, sendo que a demanda total destes clientes é de 13,018 toneladas e a distância total percorrida pelo caminhão é de 373,44 quilômetros. A Tabela 8 apresenta um resumo contendo os horários, demanda e tempo de serviço dos clientes atendidos pelo veículo 02.

Figura 31: Rota do veículo 01

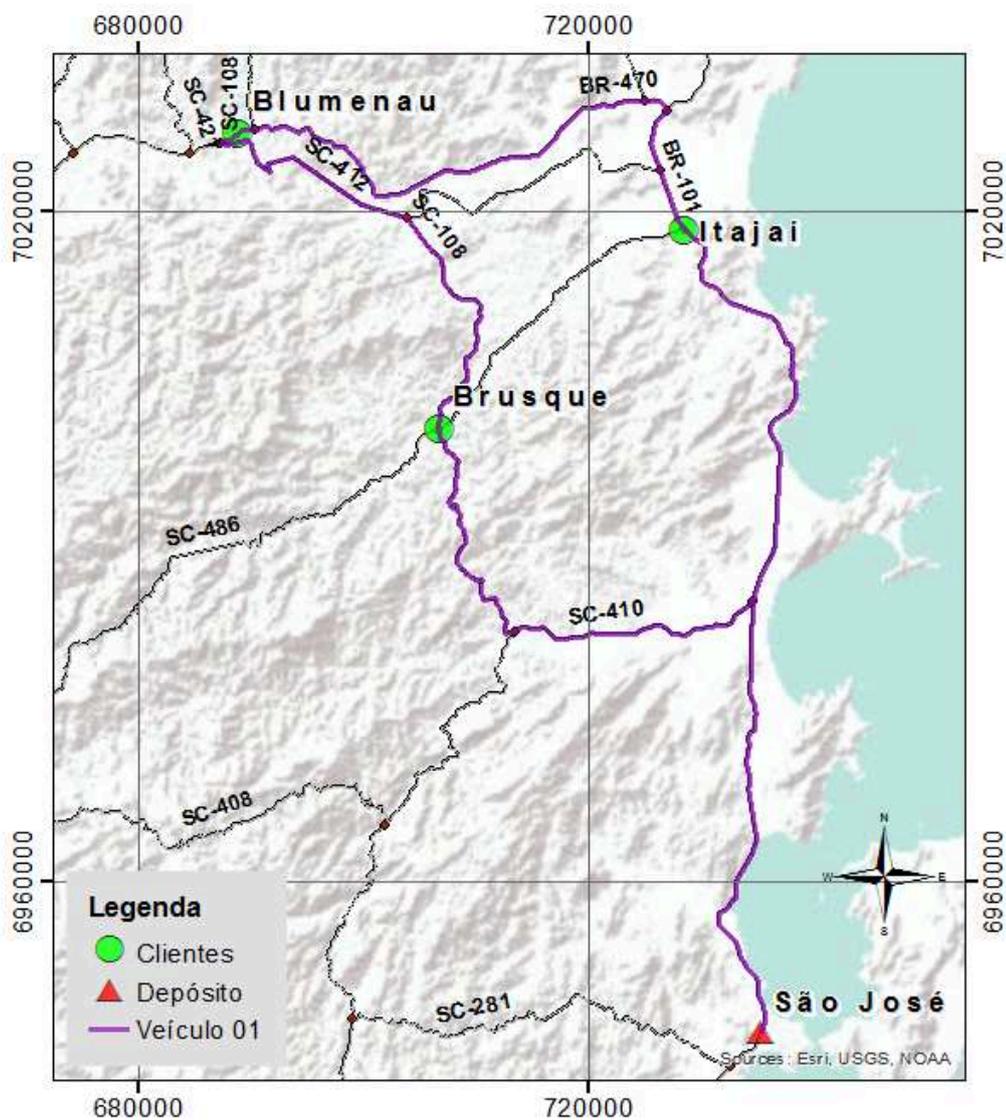


Tabela 8: Tabela resumo do veículo 02

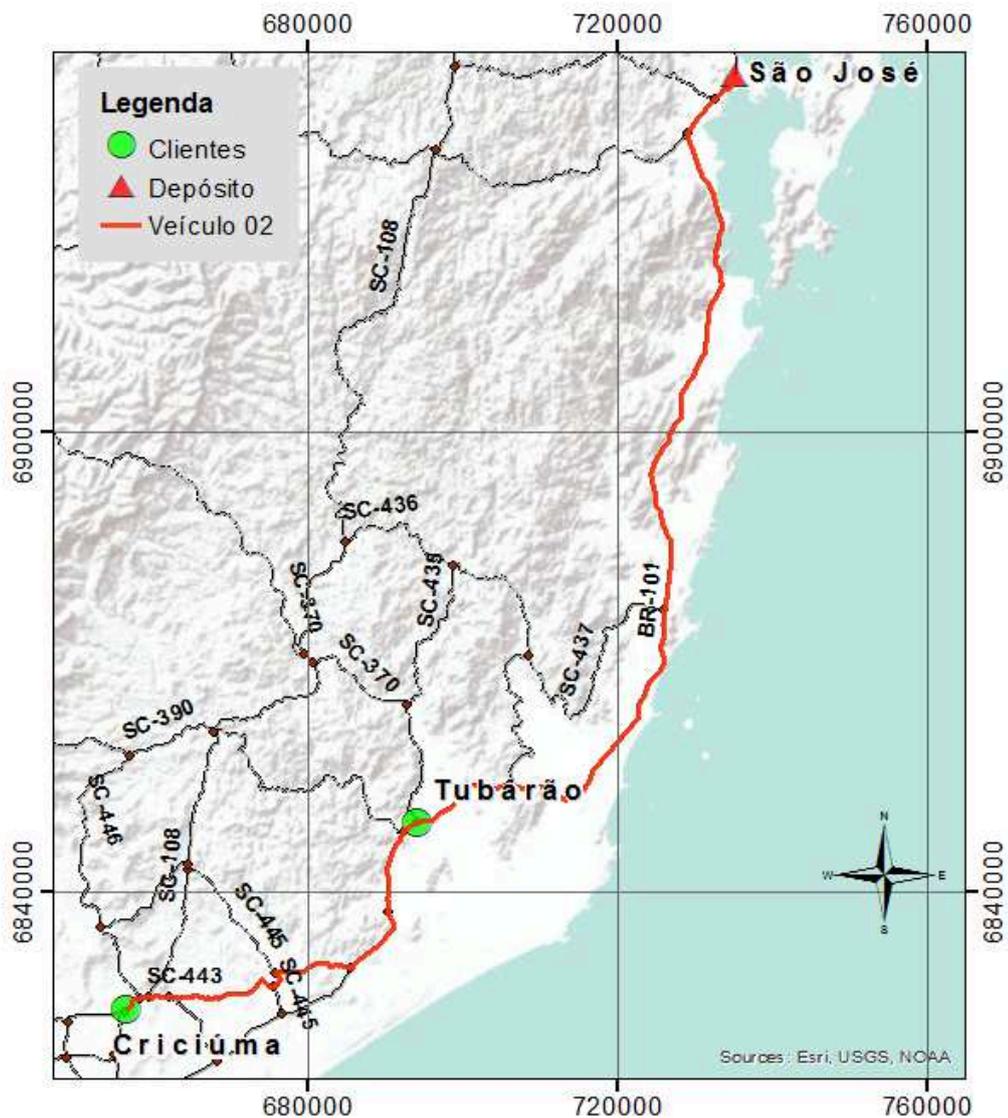
Cidade	Demanda (toneladas)	Horário inicial	Horário final	Tempo de serviço (horas)	Horário de chegada	Horário de saída
Tubarão	5,036	08:00:00	12:00:00	0,5	09:27:09	09:57:09
Criciúma	7,982	08:00:00	15:00:00	0,5	10:44:46	11:14:46

A rota do veículo 02 consiste em sair do depósito, em São José, as 08:00:00, visitar as cidades de Tubarão (cliente 01) e Criciúma (cliente 02), e por fim retornar ao depósito as 13:29:32, com uma ociosidade de 6 horas e 31 minutos. A Figura 32 mostra a rota do veículo 02 e a Tabela 9 apresenta a sequência observada de rodovias e cidades que o veículo percorre em sua rota.

Tabela 9: Resumo da rota do veículo 02

Rota	Distância (km)
São José	
BR-101	128,44
Tubarão	
BR-101	23,30
SC-443	31,38
SC-108	3,60
Criciúma	
SC-108	3,60
SC-443	31,38
BR-101	151,74
São José	

Figura 32: Rota do veículo 02



4.1.3 Veículo 03

O veículo 03 atende os clientes que se localizam nas cidades de Itajaí, Vidal Ramos, São Joaquim e Urubici, sendo que a demanda total destes clientes é de 15,346 toneladas e a distância total percorrida pelo caminhão é de 599,92 quilômetros. A Tabela 10 apresenta um resumo contendo os horários, demanda e tempo de serviço dos clientes atendidos pelo veículo 03.

Tabela 10: Tabela resumo do veículo 03

Cidade	Demanda (toneladas)	Horário inicial	Horário final	Tempo de serviço (horas)	Horário de chegada	Horário de saída
Itajaí	7,611	09:00:00	14:00:00	0,5	08:58:55	09:30:00
Vidal Ramos	2,261	08:00:00	14:00:00	0,5	11:11:09	11:41:09
São Joaquim	3,030	08:00:00	18:00:00	0,5	14:43:21	15:13:21
Urubici	2,444	12:00:00	17:00:00	0,5	16:15:36	16:45:36

A rota do veículo 03 consiste em sair do depósito, em São José, as 08:00:00, visitar as cidades de Itajaí (cliente 01), Vidal Ramos (cliente 02), São Joaquim (cliente 03) e Urubici (cliente 04), e por fim retornar ao depósito as 19:03:14, com uma ociosidade de 57 minutos. A Figura 33 mostra a rota do veículo 03 e a Tabela 11 apresenta a sequência observada de rodovias e cidades que o veículo percorre em sua rota.

4.1.4 Veículo 04

O veículo 04 atende os clientes que se localizam nas cidades de Joinville, sendo que a demanda total destes clientes é de 14,386 toneladas e a distância total percorrida pelo caminhão é de 344,49 quilômetros. A Tabela 12 apresenta um resumo contendo os horários, demanda e tempo de serviço dos clientes atendidos pelo veículo 04.

A rota do veículo 04 consiste em sair do depósito, em São José, as 08:00:00, visitar as cidades de Joinville (cliente 01), e por fim retornar ao depósito as 14:29:53, com uma ociosidade de 5 horas e 31 minutos. A Figura 34 mostra a rota do veículo 04 e a Tabela 13 apresenta a sequência observada de rodovias e cidades que o veículo percorre em sua rota.

Figura 33: Rota do veículo 03

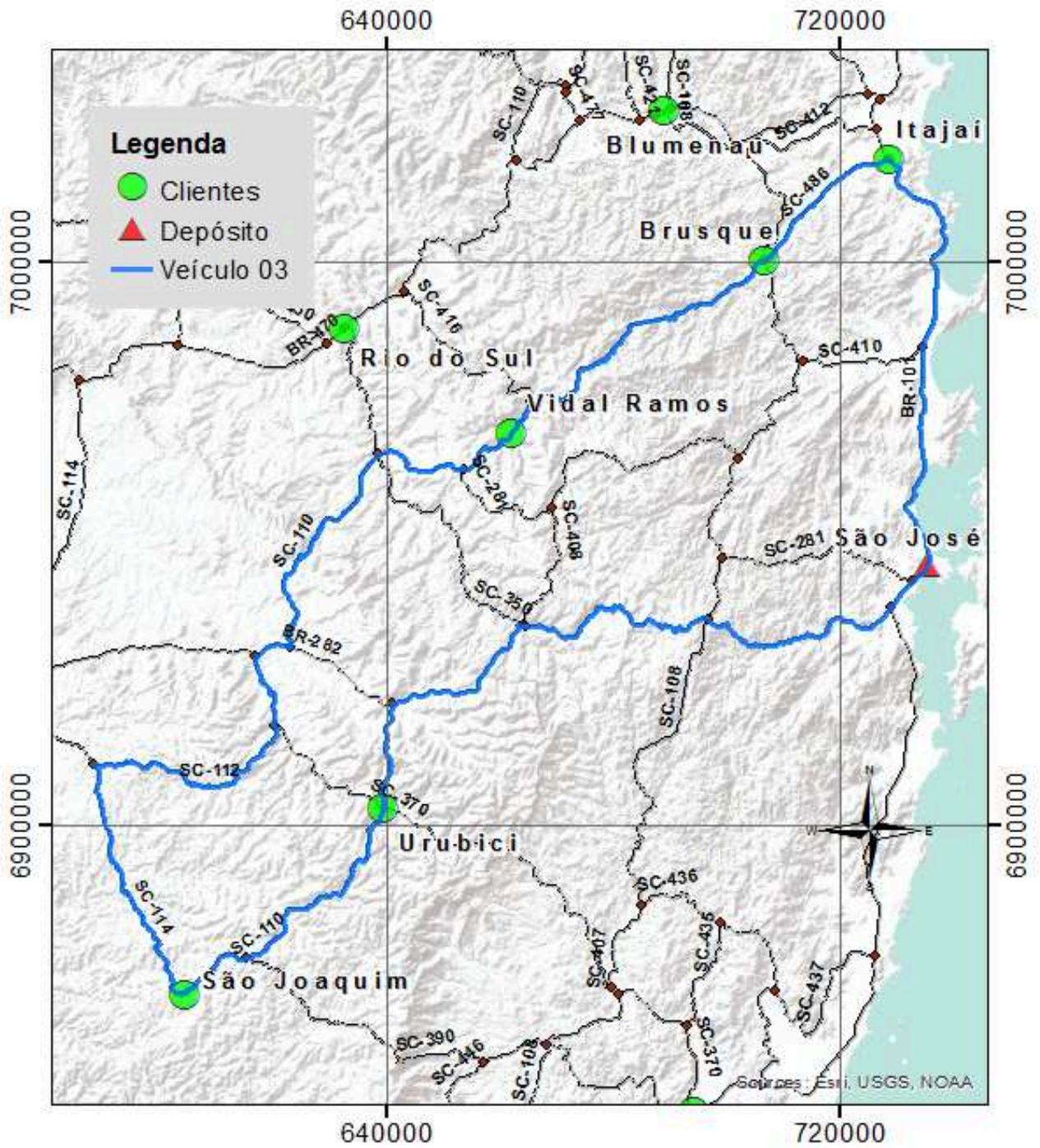


Tabela 11: Resumo da rota do veículo 03

Rota	Distância (km)
São José	
BR-101	82,59
Itajaí	
SC-486	100,61
Vidal Ramos	
SC-486	12,89
SC-110	65,95
BR-282	6,92
SC-112	61,23
SC-114	51,34
São Joaquim	
SC-114	15,21
SC-110	46,89
Urubici	
SC-110	24,43
BR-282	121,78
BR-101	10,07
São José	

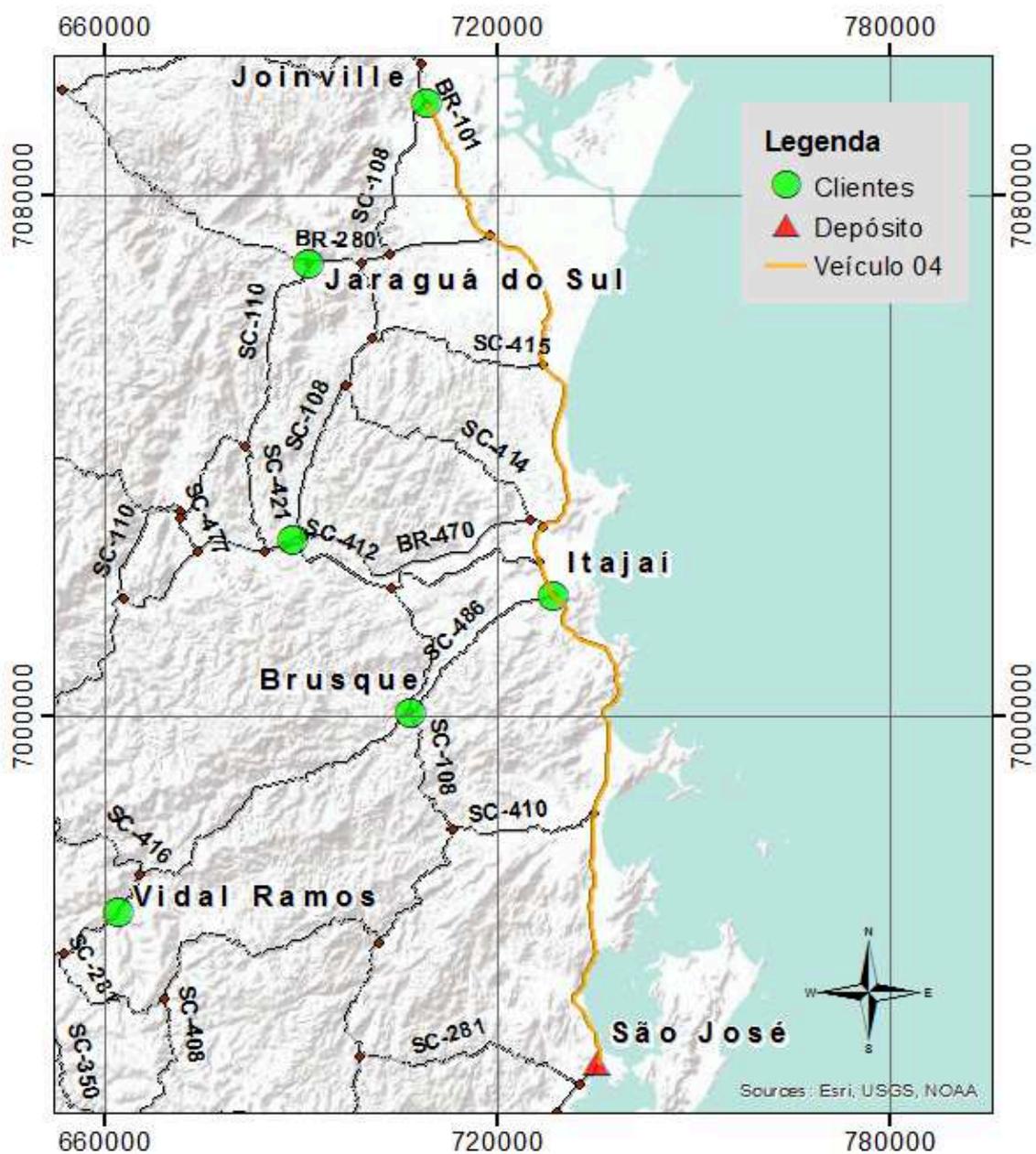
Tabela 12: Tabela resumo do veículo 04

Cidade	Demanda (toneladas)	Horário inicial	Horário final	Tempo de serviço (horas)	Horário de chegada	Horário de saída
Joinville	14,386	08:00:00	12:00:00	0,5	09:59:53	10:29:53

Tabela 13: Resumo da rota do veículo 04

Rota	Distância (km)
São José	
BR-101	172,24
Joinville	
BR-101	172,24
São José	

Figura 34: Rota do veículo 04



4.1.5 Veículo 05

O veículo 05 atende os clientes que se localizam nas cidades de Jaraguá do Sul, Rio do Sul e Curitiba, sendo que a demanda total destes clientes é de 15,047 toneladas e a distância total percorrida pelo caminhão é de 698,12 quilômetros. A Tabela 14 apresenta um resumo contendo os horários, demanda e tempo de serviço dos clientes atendidos pelo veículo 05.

Tabela 14: Tabela resumo do veículo 05

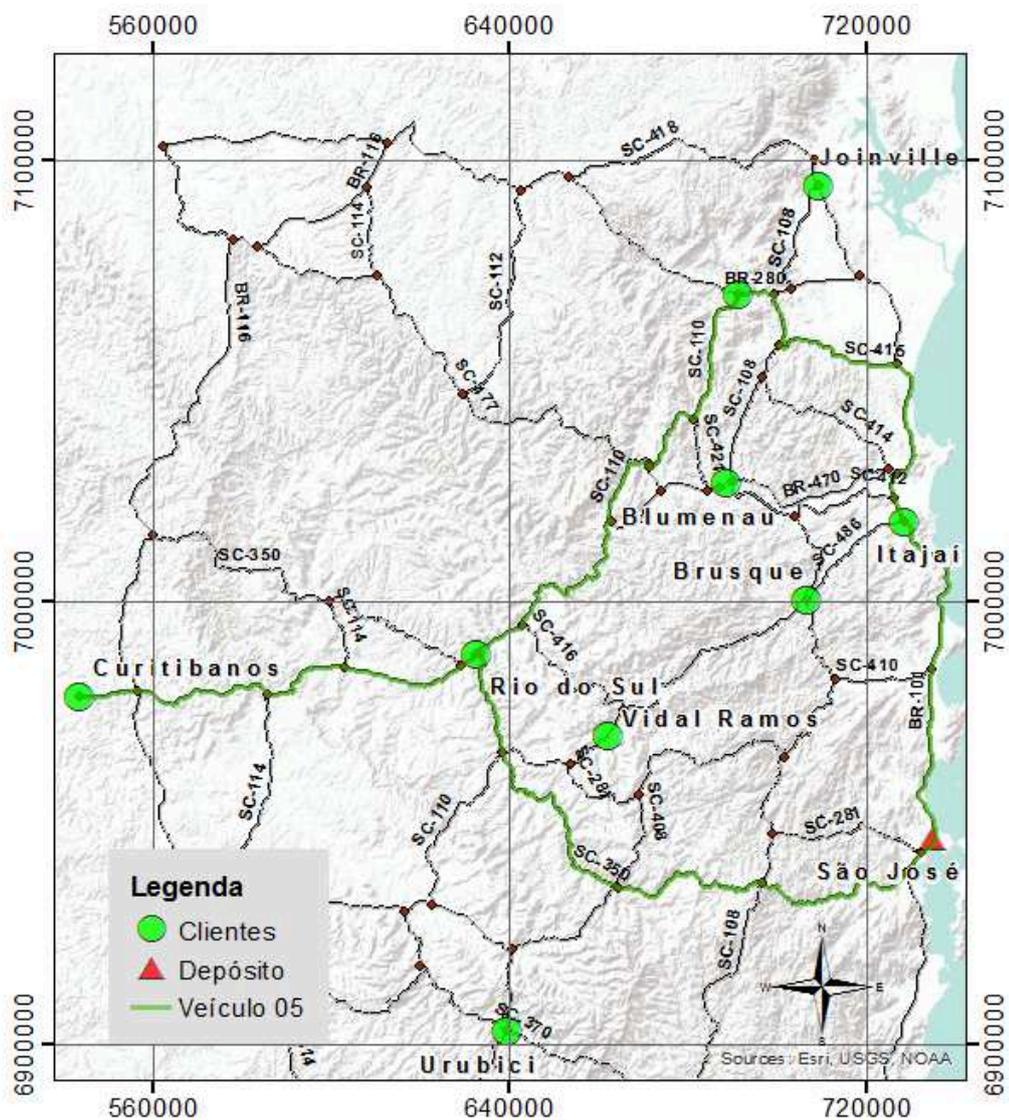
Cidade	Demanda (toneladas)	Horário inicial	Horário final	Tempo de serviço (horas)	Horário de chegada	Horário de saída
Jaraguá do Sul	6,940	09:00:00	16:00:00	0,5	10:07:55	10:37:55
Rio do Sul	4,540	10:00:00	16:00:00	0,5	12:28:48	12:58:48
Curitiba	3,567	08:00:00	18:00:00	0,5	14:39:21	15:09:21

A rota do veículo 05 consiste em sair do depósito, em São José, as 08:00:00, visitar as cidades de Jaraguá do Sul (cliente 01), Rio do Sul (cliente 02), e Curitiba (cliente 03), e por fim retornar ao depósito as 19:24:55, com uma ociosidade de 35 minutos. A Figura 35 mostra a rota do veículo 05 e a Tabela 15 apresenta a sequência observada de rodovias e cidades que o veículo percorre em sua rota.

Tabela 15: Resumo da rota do veículo 05

Rota	Distância (km)
São José	
BR-101	123,34
SC-415	31,16
SC-108	13,48
BR-280	8,53
Jaraguá do Sul	
SC-110	53,70
SC-447	1,15
SC-110	19,87
BR-470	57,42
Rio do Sul	
BR-470	103,93
Curitiba	
BR-470	103,93
SC-350	83,20
BR-282	88,33
BR-101	10,07
São José	

Figura 35: Rota do veículo 05



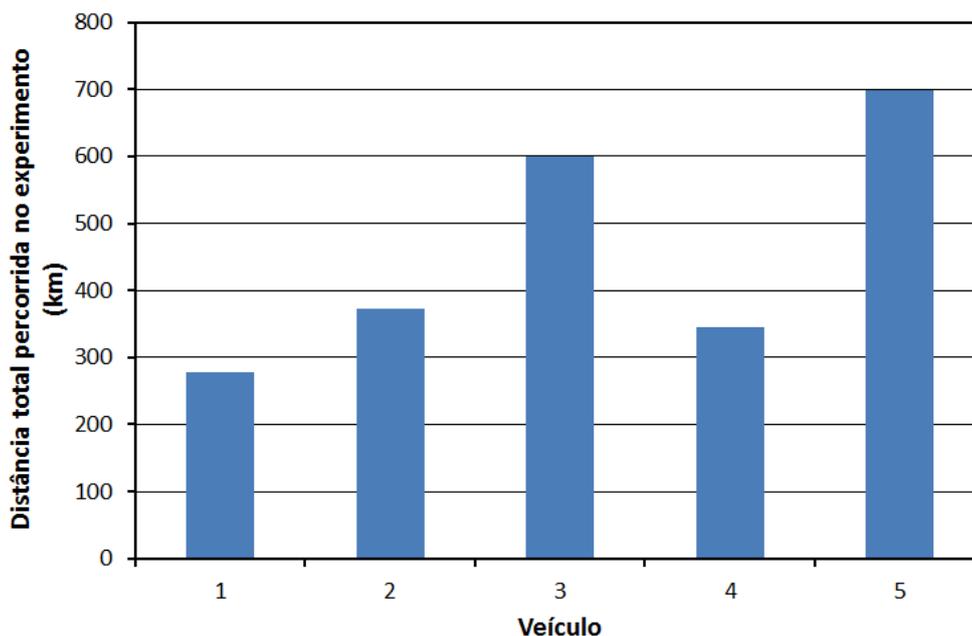
Comparando os resultados individualmente de cada caminhão, observa-se que os veículos 01, 02 e 04 estão percorrendo uma distância menor (Figura 36) e possuem um tempo de ociosidade maior em relação aos demais veículos, o que poderia se caracterizar em um superdimensionamento da frota.

Porém, para a redução do número de veículos seria necessário o aumento da capacidade destes, visto que foi escolhido o menor número de caminhões com capacidade de 16 toneladas que atenderia as demandas dos clientes, como mencionado na seção 3.3.3.

A adoção de veículos com carga maior que 16 toneladas não é interessante para a empresa, devido ao tipo de operação realizada (distribuição de mercadorias) e a questões econômicas dos caminhões. Estes motivos foram melhor explanados na seção 3.1.3.

Os resultados também indicam a possibilidade de otimização das operações da empresa

Figura 36: Comparação da distância percorrida no experimento por veículo



ficícia, porém estas análises não estão dentro do escopo do presente trabalho.

4.2 Custos operacionais dos veículos

Esta seção aborda os cálculos para a determinação do custo operacional dos veículos, este custo consiste em uma composição dos custos fixos e dos custos variáveis, abordados no item 2.4.

4.2.1 Custos fixos

- Reposição de veículo ou Depreciação (RV)

$VN = 233.500,00$ (Fonte: tabela FIPE, consulta para veículo 0 km em setembro de 2016 <www.fipe.org.br>)

$VR = 150.398,00$ (Fonte: tabela FIPE, consulta para veículo com 5 anos de uso em setembro de 2016 <www.fipe.org.br>)

$VV = 72$ meses (vida útil de 6 anos, fonte: NTC (2001))

$$RV = (VN - VR)/VV$$

$$RV = (233.500,00 - 150.398,00)/72$$

$$RV = 1.154,19$$

- Reposição do equipamento ou depreciação do Equipamento/Implemento (RE)

$VNE = 21.000,00$ (Fonte: consulta com o revendedor Nasa Caminhões CONAB (2016))
 $VRE = 14.000,00$ (Fonte: consulta com o revendedor Nasa Caminhões CONAB (2016))
 $VV = 72$ meses.

$$RE = (VNE - VRE)/VV$$
$$RE = (21.000,00 - 14.000,00)/72$$
$$RE = 97,22$$

- Remuneração mensal do capital (RC)

Valor médio do veículo = 209.449,00

Taxa de remuneração = 0,6271% (Juros mensal da poupança no período de 12/08/2016 a 12/09/2016, fonte: <www.bcb.gov.br>)

$$RC = (\text{valor médio do veículo}) \times (\text{taxa de remuneração mensal})$$
$$RC = 209.449,00 \times 0,006271$$
$$RC = 1.313,45$$

- Custos da mão de obra dos motoristas (CMO)

$ES = 96,14\%$ (Fonte: (NTC, 2001))

Salário do motorista = 1.424,00 (Salário base da categoria, fonte: <www.salarios.org.br>)

Número de motoristas por veículo = 1

$$CMO = (1 + ES) \times (\text{salário do motorista}) \times (\text{n}^\circ \text{ de motoristas por veículo})$$
$$CMO = (1 + 0,9614) \times 1.424,00 \times 1$$
$$CMO = 2.793,03$$

- Tributos incidentes sobre o veículo (TI)

$IPVA = 1\%$ do valor do veículo (Fonte: DETRAN-SC <www.detran.sc.gov.br/>)

$DPVAT = 105,81$ (Fonte: Resolução N.332, De 9 De Dezembro De 2015)

$TL = 95,17$ (Fonte: DETRAN-SC <www.detran.sc.gov.br/>)

$$TI = IPVA + DPVAT + TL$$
$$TI = (0,01 \times 233.500,00) + 105,81 + 95,17$$
$$TI = 2.535,98$$

- Custo de risco de acidente e roubo de veículo (SV)

Segundo (CONAB, 2016) o cálculo do seguro do caminhão está associado ao valor do veículo e ao coeficiente de seguro (3,82%), cobrado pela prestadora de serviço de seguro.

$$SE = (\text{prêmio do seguro do equipamento})/12$$

$$SE = (0,0382 \times 233.500,00)/12$$

$$SE = 743,31$$

Realizando o somatório destes parâmetros, obteve-se o valor de 6.312,54 reais por mês, que representa os custos que não variam com a distância percorrida.

4.2.2 Custos variáveis

- Manutenção: Mão-de-obra, peças, acessórios e material de manutenção (PM)

Segundo CONAB (2016) o custo de manutenção do veículo é de 0,19 reais.

$$VN = 233.500,00$$

$DM = 21 \text{ dias} \times 458,63 \text{ km} = 9.631,23 \text{ km}$ (Média de 458,63 km percorridos por dia, valor obtido após a simulação computacional)

$$MP = (9.631,23 \times 0,19)/233.500,00 = 0,0078 \text{ ou } 0,78\%$$

$$PM = VN \times MP/DM$$

$$PM = (233.500,00 \times 0,0078)/9.631,23$$

$$PM = 0,19 \text{ reais/km}$$

- Combustível (DC)

$PC = 2,972 \text{ Reais/l}$ (consulta mês de Setembro de 2016 para a cidade de São José Fonte: <www.anp.gov.br>)

$RM = 3,89 \text{ Km/l}$ (Fonte: CONAB (2016))

$$DC = PC/RM$$

$$DC = 2,972/3,89$$

$$DC = 0,76 \text{ Reais/km}$$

- Aditivo ARLA32 (AD)

$PA = 2,25 \text{ reais/l}$ (Valor médio obtido por pesquisa de mercado)

$RA = 77,8 \text{ km/l}$ (Segundo informativo da Petrobras o consumo de Arla 32 é 5% do

consumo de diesel do motor)

$$AD = PA/RA$$

$$AD = 2,25/0,19$$

$$AD = 0,03 \text{ reais/km}$$

- Lubrificantes (LB)

$$PLM = 10,41 \text{ reais/l (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$VC = 26 \text{ l (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$QM = 30.000 \text{ km (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$VR = 0,000867 \text{ reais/1000 km (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$LB = PLM \times (VC/QM + VR)$$

$$LB = 10,41 \times (26/30.000 + 0,000867)$$

$$LB = 0,01 \text{ reais/km}$$

- Lavagem e graxas (LG)

$$PL = 328,00 \text{ (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$QL = 30.000 \text{ km (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$LG = PL/QL$$

$$LG = 328,00/30.000$$

$$LG = 0,01 \text{ Reais/km}$$

- Pneus e recauchutagem (PR)

$$P = 1.299,00 \text{ (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$R = 797,00 \text{ (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$NR = 1 \text{ (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$NP = 10 \text{ (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$VP = 220.000 \text{ km (Fonte: CONAB (2016))}$$

$$PR = (P + C + PP + R \times NR) \times NP/VP$$

$$PR = (1.299,00 + 797,00 \times 1) \times 10/220.000$$

$$PR = 0,10 \text{ Reais/km}$$

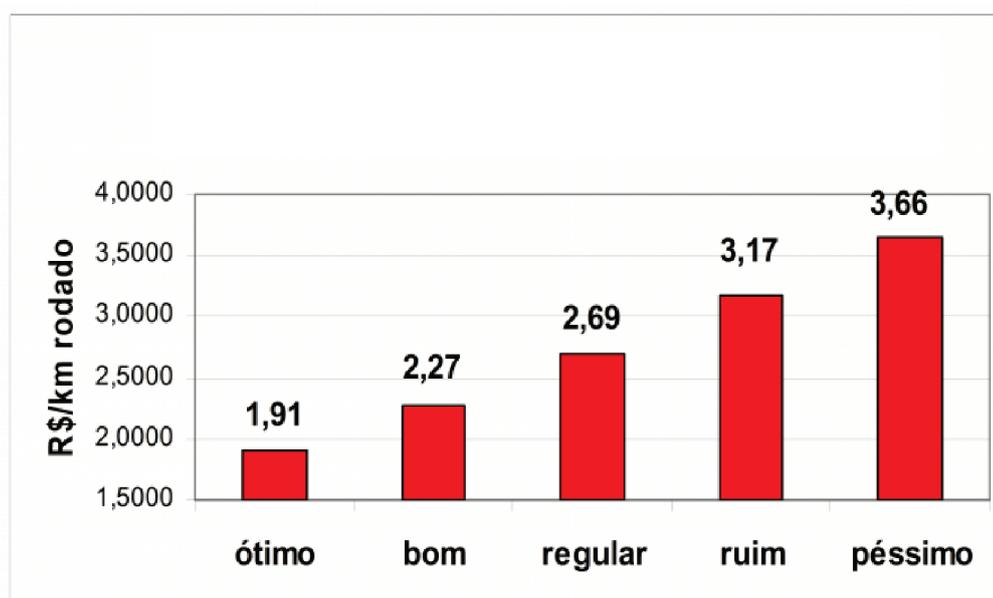
Realizando o somatório destes parâmetros, obteve-se o valor de 1,10 reais por quilômetro, que representa os custos que variam com a distância percorrida.

4.2.3 Custos operacionais segundo a produção

De acordo com CONAB (2016), o valor do custo total de produção por quilômetro, segundo a faixa de produção (quilometragem mensal executada pelo caminhão), é obtido pela divisão do total do custo fixo pela quilometragem mensal, este resultado é somado ao total do custo variável.

Segundo estudos do DECOPE/NTC <<http://www.portalntc.org.br/>>, apresentados na Figura 37, o estado de conservação das rodovias pode incrementar o custo de transporte. Este estudo mostra que, um pavimento em bom estado acarreta acréscimo de 18,8%, este percentual chega a 41% para rodovias na condição regular, atingindo 65,6% se a via tem estado ruim, e as rodovias com pavimento péssimo chegam a aumentar o custo em 91,5%.

Figura 37: Variação do custo de um veículo tracionando carreta de 3 eixos com o estado do pavimento.



Fonte: <<http://www.portalntc.org.br/>>

Com base nos valores obtidos de custos fixos e variáveis, e nos dados dos estados de conservação das rodovias obtidos em CNT (2015), a seguir são apresentados os custos totais de produção por quilômetro, com e sem incremento.

Observa-se que, CNT (2015) apresenta algumas vias sem dados de estado de conservação do pavimento (marcadas em vermelho), portanto adotou-se a condição regular para elas, a fim de não superestimar a diferença entre os custos.

- Veículo 01

Custo total de produção sem incremento

distância mensal percorrida = 277,16 km × 21 dias = 5.820,36 km/mês

custo total de produção sem incremento = (6.312,54/5.820,36) + 1,10 = 2,18 reais/km

Custo total de produção com incremento

A Tabela 16 apresenta os custos diários com e sem incremento do veículo 01.

Tabela 16: Cálculo do custo diário do veículo 01

Rota	Distância (km)	Estado geral de conservação do pavimento	Custo diário sem incremento (reais)	Custo diário com incremento (reais)
São José				
BR-101	41,84	bom	46,03	54,63
SC-410	23,63	regular	26,00	36,66
SC-108	24,95	regular	27,45	38,70
Brusque				
SC-108	24,19	regular	26,61	37,52
SC-412	20,99	regular	23,09	32,56
BR-470	1,89	regular	2,07	2,93
Blumenau				
BR-470	45,30	regular	49,83	70,26
BR-101	94,36	bom	103,79	123,30
São José				
Total	277,16	-	304,88	396,62

Segundo a Tabela 16, o veículo 01 apresenta uma variação de 30,09% nos seus custos diários, portanto o custo total de produção com incremento é dado por:

custo total de produção com incremento = (6.312,54/5.820,36) + 1,10 × 1,3009 = 2,52 reais/km

- Veículo 02

Custo total de produção sem incremento

distância mensal percorrida = 373,44 km dias = 7.842,24 km/mês

custo total de produção sem incremento = (6.312,54/7.842,24) + 1,10 = 1,90 reais/km

Custo total de produção com incremento

A Tabela 17 apresenta os custos diários com e sem incremento do veículo 02.

Segundo a Tabela 17, o veículo 02 apresenta uma variação de 22,96% nos seus custos diários, portanto o custo total de produção com incremento é dado por:

Tabela 17: Calculo do custo diário do veículo 02

Rota	Distância (km)	Estado geral de conservação do pavimento	Custo diário sem incremento (reais)	Custo diário com incremento (reais)
São José				
BR-101	128,44	bom	141,28	167,84
Tubarão				
BR-101	23,30	bom	25,63	30,45
SC-443	31,38	regular	34,52	48,67
SC-108	3,60	regular	3,96	5,58
Criciúma				
SC-108	3,60	regular	3,96	5,58
SC-443	31,38	regular	34,52	48,67
BR-101	151,74	bom	166,91	198,29
São José				
Total	373,44	-	410,78	505,09

custo total de produção com incremento = $(6.312,54/7.842,24) + 1,10 \times 1,2296 = 2,16$ reais/km

- Veículo 03

Custo total de produção sem incremento

distância mensal percorrida = 599,92 km dias = 12.598,32 km/mês

custo total de produção sem incremento = $(6.312,54/12.598,32) + 1,10 = 1,60$ reais/km

Custo total de produção com incremento

A Tabela 18 apresenta os custos diários com e sem incremento do veículo 03.

Segundo a Tabela 18, o veículo 03 apresenta uma variação de 37,57% nos seus custos diários, portanto o custo total de produção com incremento é dado por:

custo total de produção sem incremento = $(6.312,54/12.598,32) + 1,10 \times 1,3757 = 2,01$ reais/km

- Veículo 04

Custo total de produção sem incremento

distância mensal percorrida = 344,49 km dias = 7.234,29 km/mês

custo total de produção sem incremento = $(6.312,54/7.234,29) + 1,10 = 1,97$ reais/km

Custo total de produção com incremento

Tabela 18: Calculo do custo diário do veículo 03

Rota	Distância (km)	Estado geral de conservação do pavimento	Custo diário sem incremento (reais)	Custo diário com incremento (reais)
São José				
BR-101	82,59	bom	90,85	107,93
Itajaí				
SC-486	100,61	regular	110,67	156,05
Vidal Ramos				
SC-486	12,89	regular	14,18	19,99
SC-110	65,95	regular	72,55	102,29
BR-282	6,92	regular	7,61	10,74
SC-112	61,23	regular	67,35	94,97
SC-114	51,34	regular	56,47	79,63
São Joaquim				
SC-114	15,21	regular	16,73	23,59
SC-110	46,89	regular	51,58	72,73
Urubici				
SC-110	24,43	regular	26,87	37,89
BR-282	121,78	regular	133,96	188,88
BR-101	10,07	bom	11,07	13,15
São José				
Total	599,92	-	659,91	907,85

A Tabela 19 apresenta os custos diários com e sem incremento do veículo 04.

Tabela 19: Calculo do custo diário do veículo 04

Rota	Distância (km)	Estado geral de conservação do pavimento	Custo diário sem incremento (reais)	Custo diário com incremento (reais)
São José				
BR-101	172,24	bom	189,47	225,09
Joinville				
BR-101	172,24	bom	189,47	225,09
São José				
Total	344,49	-	378,94	450,18

Segundo a Tabela 19, o veículo 04 apresenta uma variação de 18,80% nos seus custos diários, portanto o custo total de produção com incremento é dado por:

$$\text{custo total de produção com incremento} = (6.312,54/7.234,29) + 1,10 \times 1,188 = 2,18 \text{ reais/km}$$

- Veículo 05

Custo total de produção sem incremento

distância mensal percorrida = 698,12 km dias = 14.660,52 km/mês

custo total de produção sem incremento = $(6.312,54/14.660,52) + 1,10 = 1,53$ reais/km

Custo total de produção com incremento

A Tabela 20 apresenta os custos diários com e sem incremento do veículo 05.

Tabela 20: Cálculo do custo diário do veículo 05

Rota	Distância (km)	Estado geral de conservação do pavimento	Custo diário sem incremento (reais)	Custo diário com incremento (reais)
São José				
BR-101	123,34	bom	135,68	161,18
SC-415	31,16	regular	34,28	48,34
SC-108	13,48	regular	14,83	20,91
BR-280	8,53	regular	9,38	13,23
Jaraguá do Sul				
SC-110	53,70	regular	59,06	83,28
SC-447	1,15	regular	1,27	1,79
SC-110	19,87	regular	21,85	30,81
BR-470	57,42	regular	63,16	89,06
Rio do Sul				
BR-470	103,93	regular	114,33	161,20
Curitibanos				
BR-470	103,93	regular	114,33	161,20
SC-350	83,20	ruim	91,52	151,55
BR-282	88,33	regular	97,16	136,99
BR-101	10,07	bom	11,07	13,15
São José				
Total	698,12	-	767,94	1072,73

Segundo a Tabela 20, o veículo 05 apresenta uma variação de 39,69% nos seus custos diários, portanto o custo total de produção com incremento é dado por:

custo total de produção com incremento = $(6.312,54/14.660,52) + 1,10 \times 1,3969 = 1,97$ reais/km

Analisando estes resultados, nota-se que o aumento da distância percorrida diminui os custos operacionais e que, os veículos que percorrem rotas em rodovias mais próximas ao litoral possuem menor incremento de custo, visto que o estado de conservação destas rodovias é, em geral, melhor.

4.3 Validação do modelo

Por se tratar de um modelo hipotético, dados reais para a comparação dos resultados são inexistentes, portanto buscou-se um parâmetro geral das rodovias para comparar os resultados apresentados pelo *software*.

O parâmetro escolhido foi o volume médio diário anual (VMDa) das rodovias, que, segundo DNIT (2008), representa o valor médio de todos os volumes diários registrados durante um ano em uma dada seção de uma via. A determinação do verdadeiro valor desse parâmetro somente é possível por meio de contagens contínuas. Ele é obtido através da aplicação da seguinte fórmula:

$$VMDa = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{365} \quad (22)$$

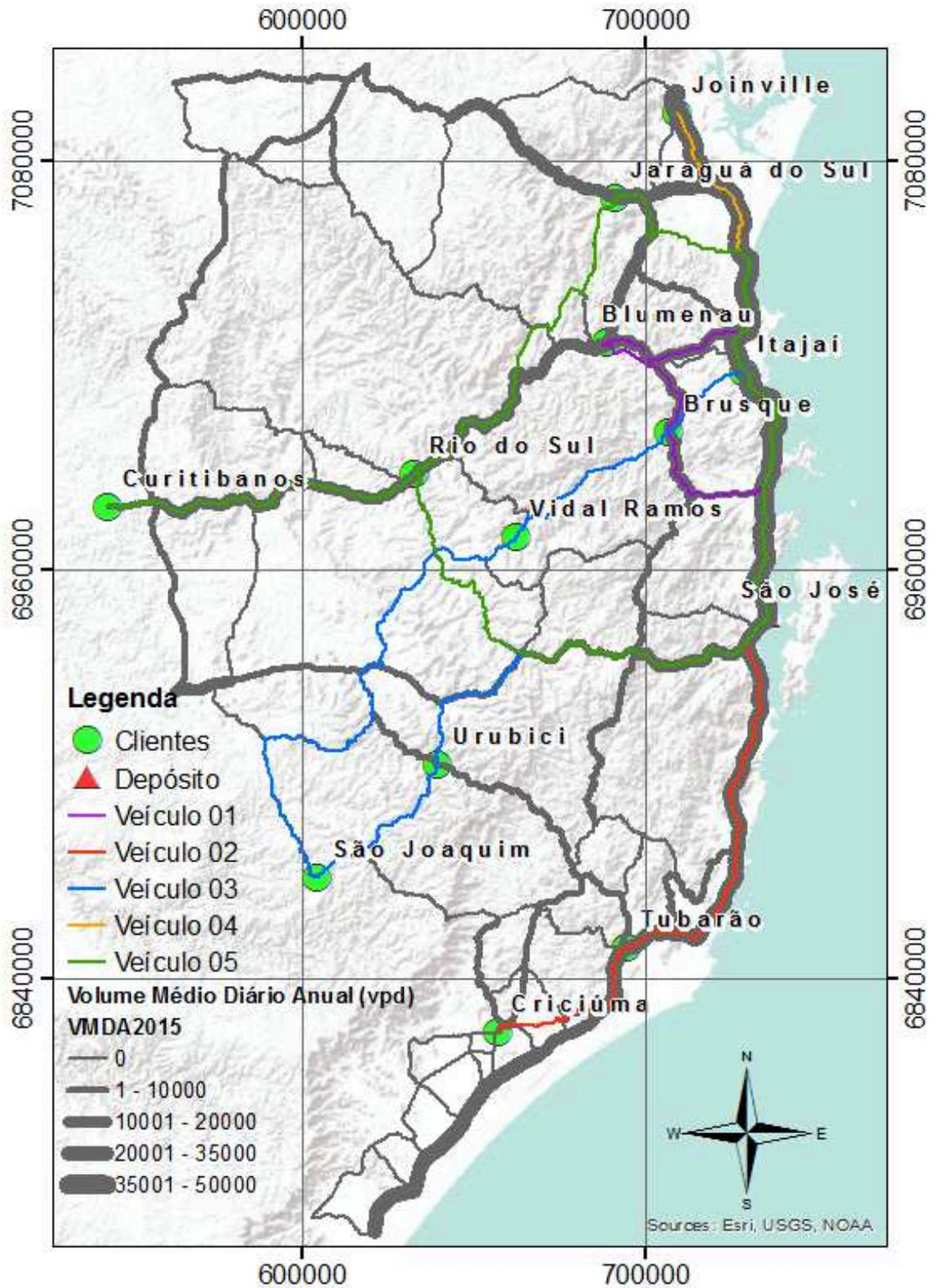
onde:

x_i = Veículos que trafegaram naquele trecho durante o período de um ano.

Os dados de VMDa das rodovias presentes na área de estudos foram obtidos do Plano Diretor Rodoviário para o Estado de Santa Catarina DEINFRA (2008). A Figura 38 mostra a representação espacial destes dados, onde o valor "0" representa a não existência de dados de contagem de tráfego.

Segundo a Figura 38 boa parte das rotas geradas pelo *software* se encontram em rodovias com VMDa maior que 10.000 vpd, o que mostra que os resultados são compatíveis com as principais rotas de Santa Catarina.

Figura 38: Comparação entre as rotas dos veículos e o VMDa das rodovias.



5 Conclusões e recomendações

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver um procedimento de distribuição intermunicipal de mercadorias de uma empresa hipotética, modelado como um problema de roteirização de veículos, utilizando uma ferramenta SIG-T.

O problema roteirização abordou clientes com janelas de tempo, ou seja, com intervalos de tempo pré estabelecidos. A análise envolveu o dimensionamento de uma frota homogênea para a distribuição de uma demanda determinística, o cálculo dos custos operacionais de transporte de cada veículo e a otimização das rotas de entrega quanto ao menor tempo de percurso.

A construção do modelo que representa o problema abordado foi realizada em três etapas: modelagem da infraestrutura, demanda e serviço. Dentre os problemas encontrados durante a modelagem pode-se citar a duplicação de alguns dados levantados, erros de topologia, nomenclatura de rodovias incoerentes com outras fontes de dados e a estimativa da velocidade de operação.

Os resultados foram verificados quanto aos volumes médios diários anuais das rodovias, pois, por se tratar de um problema hipotético, não existem dados da empresa para a comparação. A validação utilizando o VMDa das rodovias apresentou resultados compatíveis com os esperados, ou seja, as rotas geradas pelo *software* são semelhantes as principais rotas utilizadas por empresas reais e autônomos.

Pode-se afirmar que o procedimento proposto de distribuição apresentou-se como possível ferramenta para o planejamento e a operação de sistemas de transporte de entrega de mercadorias, na medida em que permite tornar suas operações mais eficientes sob os aspectos econômico.

Uma melhor adaptação do procedimento de roteirização proposto neste estudo à situações reais pode ser obtida com a inclusão de dados reais para a estimativa dos tempos de serviço das operações, das demandas dos clientes, da definição das janelas de tempo, do custo operacional dos veículos e da influencia do tráfego das vias no estudo. Portanto uma das dificuldades encontrada no presente trabalho reside na obtenção de dados para a modelagem.

Como trabalho futuro, pode-se expandir o procedimento proposto de forma a abranger diferentes critérios de impedância, tais como a distância percorrida e o custo de transporte. Desta forma, poderia-se comparar resultados utilizando estes diferentes critérios.

Esta análise mais robusta necessitaria ser implementada em outra ferramenta, visto que a função do *Network Analyst* que realiza a roteirização com restrições de janelas de tempo, somente otimiza rotas quanto ao menor tempo de percurso.

Referências

- ALBANO, J. F. *Efeitos dos Exessos de Carga Sobre a Durabilidade de Pavimentos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- ANTENUCCI, J. et al. *Geographic Information Systems - a Guide to the Technology*. [S.l.: s.n.], 1991.
- ASSAD, A. A. *Modeling and Implementation Issues in Vehicle Routing. Vehicle Routing: Method and Studies*. [S.l.]: Elsevier Sciences Publisher, Amsterdam, 1988.
- BELFIORE, P. P. *Scatter Search para Problemas de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea, Janela de Tempo e Entrega Fracionadas*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- BODIN, L. et al. Routing and scheduling of vehicle and crews: The state of the art. *Computer & Operations Research*, v.10, n.2, p.63-211., 1983.
- BODIN, L. D.; GOLDEN, B. *Classification in Vehicle Routing and Scheduling*. [S.l.: s.n.], 1981.
- BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. *Graph Theory With Applications*. [S.l.]: The Macmillan Press, 1976.
- BRASIL. *Manual de estudos de tráfegos*. [S.l.], 2006.
- BREJON, S. R. C. *Algoritmo para Resolução do Problema de Programação do Transporte de Suprimentos para Unidades Marítimas de Exploração de Petróleo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 1999.
- BURIN, P. J. *Roteirização Dinâmica de Veículos em Áreas Urbanas Congestionadas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- CÂMARA, G. et al. *Anatomia de Sistemas de Informações Geográficas*. [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Processamento de Imagens, São José dos Campos, 1996.
- CAMPOS, V. B. G. *Método de Alocação de Fluxo no Planejamento de Transportes em Situações de Emergência: Definição de Rotas Disjuntas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- CARDOSO, D. M. *Teoria dos Grafos e Aplicações*. [S.l.: s.n.], 2005.
- CHRISTOFIDES, N. The traveling salesman problem: A guide tour of combinatorial optimization. 1985.
- CNT. *Pesquisa CNT de Rodovias*. [S.l.], 2015.
- CNT. *Boletim Estatístico - Junho*. [S.l.], 2016.
- COELHO, A. H. et al. Automatic horizontal road design information extraction from georeferenced polygons: A brazilian federal highway network study. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2015.
- CONAB. *Manual de Cálculo de Custo Operacional Rodoviário de Carga para Veículo de Distribuição e Adicionais no Valor do Transporte*. [S.l.], 2016.

- CORDENONSI, A. Z. *Ambientes, Objetos e Dialogicidade: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- CUNHA, C. B. D. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. 2000.
- DANTAS, A. S. et al. Aplicação dos sistemas de informações geográficas em transportes sob o enfoque da análise espacial. *IV Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo, 1997*.
- DANTAS, A. S.; TACO, P. W. G.; YAMASHITA, Y. Sistemas de informação geográfica em transportes: O estudo do estado da arte. *X Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, 1996.
- DANTZIG, G. B.; FULKERSON, D. R.; JOHNSON, S. M. Solution of a large-scale traveling salesman problem. 1954.
- DEINFRA. *Plano Diretor Rodoviário Para o Estado de Santa Catarina*. [S.l.], 2008.
- DNER. *Manual de projeto geométrico de rodovias rurais*. [S.l.], 1999.
- DNIT. *Roteiro Básico para Sistemas Rodoviários Estaduais*. [S.l.], 2006.
- DNIT. *Projeto Trienal de Coleta de Tráfego*. [S.l.], 2008.
- ESRI. *Geodatabase Tutorial*. [S.l.], 2008.
- ESRI. *Network Analyst Tutorial*. [S.l.], 2010.
- FEOFILLOF, P. Uma introdução sucinta á teoria dos grafos. <http://www.ime.usp.br/pf/teoriados-grafos/>, 2011.
- FIESC. *Santa Catarina em Dados*. [S.l.], 2015.
- GEIPOT. *Transporte no Brasil: Histórias e Reflexões*. [S.l.]: Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes GEIPOT., 2001.
- GLENNON, J.; NEWMAN, T.; LEISCH, J. *Safety and operational considerations for design of rural curves*. [S.l.], 1985.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. R. *Otimização Combinatória e Programação Linear*. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda., 2005.
- GONÇALVES, B. S. *Um Procedimento para Escolha Modal do Transporte Terrestre de Carga Geral no Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- JUNIOR, A. A. R. *Acessibilidade e Mobilidade na Estimativa de um Índice de Potencial de Viagens Utilizando Redes Neurais Artificiais e Sistemas de Informações geográficas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2000.
- LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M. *Recommendations for Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency Based on Investigations in the State of New York*. 1987. 68–78 p.
- LAMM, R. et al. *Possible Design Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads*. 1988. 111–122 p.

- LAMM, R.; CHOUEIRI, E. M.; MAILAENDER, T. *Comparison of Operating Speed od Dry and Wet Pavement of Two Lane Rural Highways*. 1990. 199-207 p.
- MAPA, S. M. S.; LIMA, R. S. Sistemas de informação geográfica (sig) como ferramenta suporte a estudos de localização e roteirização. 2005.
- MARTINS, L. F. F.; LOPES, L. A. S. Roteirização de veículos de cargas perecíveis usando sistemas de informação geográfica. 2014.
- MASUTTI, T. A. S.; CASTRO, L. N. Uma rede neuro-imune aplicada ao problema de múltiplos caixeiros viajantes. *Learning and Nonlinear Models*, 2007.
- MATIAS, L. F. *Sistema De Informações Geográficas (SIG): Teoria e Método para Representação do Espaço Geográfico*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2001.
- MCLEAN, J. R. Observed speed distributions and rural road traffic operations. In: *Proc. 9th Australian Road Research Board Con.* [S.l.: s.n.], 1978. v. 9, p. 235–244.
- NAZÁRIO, P. Definições e aplicações na logística. *Revista Tecnológica*, 1998.
- NTC. *Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas*. [S.l.], 2001.
- PAULA, M. A. A. F. D. *Estudo de Roteirização de Veículos Empregando o TransCAD*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- POE, C. M.; JR., J. M. M. Geometric design guidelines to achieve desired operating speed on urban streets. *ITE Annual Meeting Compendium, Institute of Transportation Engineers*, p. 70–74, 1995.
- RONEN, D. Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling. *European Journal of Operational Research.*, 1988.
- ROSE, A. *Uma Avaliação Comparativa de Alguns Sistemas de Informação Geográfica Aplicados aos Transportes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2001.
- SALLES, R. S. *Estudo de Roteirização de Veículos com Apoio de um Sistema de Informações Geográficas - Contribuição para o Transporte Urbano de Empregados por uma Frota de Ônibus Fretada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.
- SANTOS, L. D.; JUNIOR, A. A. R. Distribuição espacial dos acidentes de trânsito em são carlos (sp): Identificação de tendências de deslocamento através da técnica de elipse de desvio padrão. *Caminhos de Geografia.*, 2006.
- SEBRAE. *Santa Catarina em Números*. [S.l.], 2013.
- SILVA, R. C. O. *Avaliação da Implantação de Softwares de Roteirização de Veículos*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro., 2007.
- WORRALL, S.; NEBOT, E. Automated process for generating digitized maps through gps data compression. 2007.