



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

GEORGE VASCONCELOS GOES

**MODELAGEM DA VULNERABILIDADE, CONFIABILIDADE E RISCO PARA
ESCOLHA DE ROTA NO TRANSPORTE URBANO DE CARGA**

FORTALEZA

2015

GEORGE VASCONCELOS GOES

MODELAGEM DA VULNERABILIDADE, CONFIABILIDADE E RISCO PARA
ESCOLHA DE ROTA NO TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- G543m Goes, George Vasconcelos.
 Modelagem da vulnerabilidade, confiabilidade e risco para escolha de rota no transporte urbano de carga / George Vasconcelos Goes. – 2015.
 180 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2015.
 Área de Concentração: Transporte e Logística da Carga.
 Orientação: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.
1. Transportes. 2. Confiabilidade. 3. Vulnerabilidade. 4. Risco. I. Título.

GEORGE VASCONCELOS GOES

MODELAGEM DA VULNERABILIDADE, CONFIABILIDADE E RISCO PARA
ESCOLHA DE ROTA NO TRANSPORTE URBANO DE CARGA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini.

Aprovada em: 06 / 04 / 2015 por:

BANCA EXAMINADORA



Prof. Bruno Vieira Bertoncini, DSc.

(Orientador – UFC)



Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto, PhD

(Examinador Interno – UFC)



Prof. Mônica Maria Mendes Luna, DSc.

(Examinador Externo – UFSC)

Dedico este trabalho à minha família e a todos que, de maneira própria, contribuíram com a minha formação.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por sempre estar presente, dando suporte e apoio para continuar crescendo no âmbito acadêmico, profissional e de vida.

Ao Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini, pela dedicação, confiança e excelente orientação.

Aos professores participantes da Banca examinadora de qualificação Manoel Mendonça de Castro Neto e Carlos Augusto Uchôa da Silva pela valiosa atenção concedida, colaboração e interesse demonstrado.

Aos professores da Banca examinadora de defesa pela apreciação despendida.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, motivações e amizades obtidas.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“Vivemos em um mundo que está cheio de riscos, riscos que em grande medida criaram a nós mesmos. Onde ocorre naturalmente risco, praticamente não o existe mais”.

Jan Hovden

Resumo da dissertação a ser submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M.Sc.) em Engenharia de Transportes.

MODELAGEM DA VULNERABILIDADE, CONFIABILIDADE E RISCO PARA
ESCOLHA DE ROTA NO TRANSPORTE URBANO DE CARGA

GEORGE VASCONCELOS GOES

Abril/2015

Orientador: Bruno Vieira Bertoncini

Os problemas de mobilidade urbana estão relacionados, dentre outros, à distribuição espacial das atividades, ao crescimento expressivo do uso do automóvel, associado a um sistema deficiente de transporte público, e à ocorrência de impactos negativos provocados pelas atividades de movimentação de cargas nas áreas adensadas. A concentração populacional nas cidades confere aos centros urbanos papel de núcleos de consumo, que devem ser abastecidos continuamente a partir de fluxos de natureza e origem muito diversas. Estimar a confiabilidade, o risco e a vulnerabilidade associados à rota escolhida entre diversos pontos de origem e destino pode representar mudança na tomada de decisão. Conforme o custo incorrido em uma rota de maior risco, maior variabilidade no tempo de viagem, ou mais vulnerável à incidentes, supere o custo projetado de uma rota de otimizada pelo tempo (baseada no caminho mínimo), tal decisão pode ser reavaliada. O objetivo geral do presente trabalho fora representar o custo generalizado, incorporando o conceito da vulnerabilidade, da confiabilidade e do risco de uma rede viária urbana para tomada de decisão quanto à escolha de rota no transporte de carga. Para isso, desenvolveu-se um método para modelagem do custo generalizado que incorpore os três atributos em cenários distintos de abastecimento. O experimento evidenciou a existência de *trade-off* (escolha conflitante) entre as variáveis de tempo médio de viagem, confiabilidade/risco e o custo generalizado. Apenas as informações de tempo e custo da viagem não são suficientes para suprir as condições de entrega da mercadoria. Para o transportador, deter o conhecimento da confiabilidade, ou do risco, da entrega da mercadoria pode ser um pilar estratégico de redução de custos ou de ganho de mercado à médio e longo prazo.

Palavras-chave: Rede de transporte, Confiabilidade, Vulnerabilidade e Risco.

Abstract of the Thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

MODELING OF VULNERABILITY, RELIABILITY AND RISK FOR ROUTE CHOICE
IN URBAN FREIGHT TRANSPORT

GEORGE VASCONCELOS GOES

April/2015

Advisor: Bruno Vieira Bertoncini

The problems of urban mobility are related, among others, the spatial distribution of activities, the significant growth of automobile use, associated with a poor public transport system, and the occurrence of negative impacts caused by load handling activities in densely populated areas. The population concentration in cities gives urban centers the role of consumption nuclei, which must be supplied continuously from streams of very different nature and origin. To estimate the reliability, risk and vulnerability associated with the route chosen from several points of origin and destination can represent change in decision making. As the cost incurred on a route to greater risk, greater variability in travel time, or more vulnerable to incidents exceed the projected cost of a route optimized by time (based on the shortest path), such a decision can be reviewed. The general objective of this study was to represent the generalized cost, incorporating the concept of vulnerability, reliability and risk of urban road network for decision making regarding the choice of route for cargo transportation. Thus, we developed a method for modeling the generalized cost that incorporates the three attributes in different supply scenarios. The experiment showed the existence of trade-off (conflicting choice) between the average time variables trip, reliability / risk and the generalized cost. Only the information of time and cost of travel are not sufficient to meet the conditions of delivery of merchandise. For the driver, holds the knowledge of the reliability or the risk of delivery of the goods can be a strategic pillar cost reduction or the medium and long-term market gains.

Keywords: Transport network, Reliability, Vulnerability and Risk.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	19
INTRODUÇÃO	19
1.1 Contextualização	19
1.2 Problema e Questões de Pesquisa	22
1.3 Objetivos	23
1.4 Método	24
1.4.1 Estudo do estado da arte	25
1.4.2 Analisar os efeitos da Confiabilidade, Vulnerabilidade e Risco	25
1.4.3 Experimento de modelagem de rede	26
1.4.4 Análise dos resultados e considerações finais	26
1.5 Relevância do tema e originalidade	27
1.6 Estrutura da dissertação	27
CAPÍTULO 2	29
REDE DE TRANSPORTES: PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICO	29
2.1 Sistemas de transporte	29
2.1.1 Custos	33
2.1.2 Capacidade	34
2.2 Desempenho	36
2.2.1 Nível de serviço	38
2.2.2 Atributo do congestionamento	39
2.2.3 Atributo da acessibilidade	40
2.2.4 Atributo da flexibilidade	41
2.3 Considerações do capítulo	41
CAPÍTULO 3	42
MODELAGEM DA REDE DE TRANSPORTES: MÉTODOS DE ALOCAÇÃO E ESCOLHA DE ROTAS	42
3.1 Conceituação de grafos	42
3.1.1 Elementos constituintes	44
3.2 Algoritmos de escolha de rotas baseados em custo mínimo	45
3.3 Métodos para distribuição dos fluxos	46
3.3.1 Rede não congestionada	48
3.3.1.1 Tudo-ou-nada (<i>all-or-nothing</i>)	48
3.3.1.2 Método de Burrell (1968)	50
3.3.2 Rede congestionada	52
3.3.2.1 Equilíbrio de Wardrop	52

3.3.2.2 Alocação incremental.....	53
3.3.2.3 Método das Médias sucessivas.....	54
3.3.2.4 Equilíbrio estocástico do usuário.....	54
3.4 Modelos de processamento determinísticos.....	55
3.5 Modelos de processamento estocásticos.....	56
3.6 Considerações do capítulo	56
CAPÍTULO 4.....	59
CONFIABILIDADE, VULNERABILIDADE E RISCO NA MODELAGEM	
APLICADO AO TRANSPORTE DE CARGAS	59
4.1 Cálculo de custos no transporte de cargas	59
4.1.1 Formação do preço de frete	60
4.1.2 Formação dos custos operacionais.....	63
4.1.2.1 Custos fixos	63
4.1.2.2 Custos variáveis.....	64
4.2 Atributo da vulnerabilidade	65
4.2.1 Conceito de vulnerabilidade	65
4.2.2 Redes vulneráveis	66
4.3 Atributo da confiabilidade	71
4.2.1 Variações do tempo em função do volume	73
4.2.2 Variações do tempo em função da capacidade.....	74
4.2.3 Métodos de contingência.....	76
4.4 Atributo do risco.....	77
4.4.1 Modelos de previsão de acidentes (MPA).....	78
4.5 Distinções entre os atributos	79
4.6 Classificação dos distúrbios.....	81
4.7 Indicadores de vulnerabilidade e confiabilidade.....	81
4.7.1 Índice de Robustez da Rede – NRI	82
4.7.2 Índice de Robustez da Rede-modificado – NRI-m	83
4.7.3 Índice de Erath <i>et al</i>	84
4.8 Modelos de vulnerabilidade e confiabilidade	86
4.8.1 Impedâncias.....	86
4.8.1.1 Custo generalizado na modelagem de rede de transportes.....	88
4.8.2 Métodos de estimação da vulnerabilidade.....	89
4.8.2.1 Primeiro grupo	91
4.8.2.2 Segundo grupo	93
4.8.3 Métodos de estimação da confiabilidade.....	93

4.9	Considerações do capítulo	96
CAPÍTULO 5	97
MÉTODO: IDENTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DA CONFIABILIDADE, VULNERABILIDADE E RISCO NA ESCOLHA DA ROTA	97
5.1	Delimitação da rede.....	99
5.1.1	Zona com restrição de circulação (ZRC)	99
5.1.2	Matriz OD de carga.....	101
5.2	Alocação da Matriz OD à rede de transportes	101
5.2.1	Caminho mínimo	102
5.2.1	Equilíbrio do usuário.....	102
5.3	Estimação do custo generalizado	103
5.4	Mensuração da confiabilidade.....	104
5.4.1	Equipamento e material.....	104
5.4.2	Coleta	104
5.4.3	Dados.....	105
5.5	Mensuração do risco.....	105
5.5.1	Classificação dos distúrbios	105
5.5.2	Escolha das variáveis explicativas	106
5.5.3	Previsão do risco	106
5.6	Elaboração dos cenários de avaliação	107
5.7	Avaliação do desempenho (Delta)	107
5.8	Mensuração da vulnerabilidade.....	108
5.9	Análise dos resultados	108
5.10	Considerações do capítulo	108
CAPÍTULO 6	110
EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
6.1	Rede viária	110
6.1.1	Atributos dos arcos.....	113
6.1.1.1	Contagem de tráfego	114
6.1.2	Elementos de suprimento	115
6.1.2.1	Veículo urbano de carga (VUC).....	115
6.1.2.2	Distribuição espacial da demanda.....	116
6.2	Cenários	123
6.2.1	Classificação dos arcos (confiabilidade).....	124
6.2.2	Medição do risco.....	127
6.3	Simulação.....	128
6.3.1	Resultados.....	130

6.3.1.1 Cenários de risco (2 ao 5).....	131
6.3.1.2 Cenários de confiabilidade (6 ao 9)	139
6.4 Considerações do capítulo	143
CAPÍTULO 7.....	145
CONCLUSÕES.....	145
7.1 Objetivos e Questões de pesquisa	145
7.1.1 Objetivo I.....	145
7.1.2 Objetivo II	146
7.1.3 Objetivo III	146
7.1.4 Objetivo IV	147
7.1.5 Objetivo V	148
7.2 Recomendações para trabalhos futuros	149
REFERÊNCIAS.....	151
ANEXO A – DADOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (C 815).....	157
ANEXO B – TABELA DE ATRIBUTOS DO ARCO (STATUS QUO)	159
ANEXO C – DADOS DE MANUTENÇÃO (C 815).....	161
ANEXO D – MÉTODO DO OBSERVADOR MÓVEL.....	162
ANEXO E – ROTAS MÍNIMAS PELO TRANSCAD 4.5 (DIJKSTRA)	163
ANEXO F – MEDIÇÃO PELO MÉTODO DAS PLACAS NA AV. DOM LUÍS.....	174
ANEXO G – MEDIÇÃO PELO MÉTODO DAS PLACAS NA AV. S. DUMONT	175
ANEXO H – DADOS DE VOLUME E CUSTOS DOS ARCOS (STATUS QUO)	178
ANEXO I – DADOS DE CONFIABILIDADE E RISCO DOS ARCOS (S. QUO)	179
ANEXO J – GENERALIDADES NO TRANSPORTE DE CARGA (DECOPE, 2014)	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura sistematizada do método proposto.....	24
Figura 2 – Relação entre sistema de transporte e sistema de atividades.....	31
Figura 3 – Atributos de desempenho do sistema.....	37
Figura 4 – Congestionamento como função do tempo e do fluxo.....	40
Figura 5 – Grafo não direcionado.....	43
Figura 6 – (i) custos da rede, não congestionada, na alocação tudo-ou-nada; (ii) alocação A-C/A-D; (iii) alocação B-C/B-D; (iv) resultado.....	49
Figura 7 – Gráficos que representam os processos de simulações determinísticas e estocásticas.....	55
Figura 8 – Preço de frete <i>versus</i> custos operacionais.....	60
Figura 9 – Vulnerabilidade de um sistema.....	67
Figura 10 – Exemplo de uma rede viária urbana vulnerável.....	68
Figura 11 – Atributos de desempenho do sistema.....	69
Figura 12 – Rede de transportes da Nova Zelândia.....	70
Figura 13: Representação da alteração de rota mediante degradação de um arco.....	87
Figura 14 – Aumento nos tempos de viagem mediante simulação completa.....	91
Figura 15 – Etapas metodológicas para mensuração dos custos da vulnerabilidade.....	98
Figura 16 – Zona com restrição de circulação de veículos de carga em Fortaleza.....	100
Figura 17 – Rede de viária de Fortaleza (TransCAD 4.5), com destaque para a região do experimento.....	111
Figura 18 – Corte da rede viária urbana.....	112
Figura 19 – Ford Cargo 815.....	116
Figura 20 – Pontos OD distribuídos na rede.....	119
Figura 21 – Caminhos mínimos obtidos no TransCAD 4.5 para o par 6-1 ($k=3$).....	121
Figura 22 – Localização dos radares.....	125
Figura 23 – Representação dos arcos obstruídos.....	130

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição Normal da variável de percepção dos custos dos motoristas.....	51
Gráfico 2 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo (volume) de tráfego em um arco.....	73
Gráfico 3 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo de tráfego (volume) e da variação da capacidade em um arco	74
Gráfico 4 – Média e variância do tempo de viagem em função do grau de saturação do tráfego (V/C)	75
Gráfico 5 – Função densidade do tempo de viagem.....	94
Gráfico 6 – Distribuições dos tempos de viagem	95
Gráfico 7 – Aumento de custos por cenário	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Esquema de classificação para alocação de tráfego	47
Tabela 2 – Lista de componentes da rede de transportes.....	100
Tabela 3 – Especificações do veículo urbano de carga (VUC).....	101
Tabela 4 – Variáveis significativas utilizadas no modelo de previsão de acidentes	106
Tabela 5 – Instalações de transportes e serviços	111
Tabela 6 – Capacidades dos arcos da rede	113
Tabela 7 – Atributos dos trechos	113
Tabela 8 – Atributos consolidados da rede	114
Tabela 9 – Características técnicas do veículo	116
Tabela 10 – Dados de consumo do veículo.....	117
Tabela 11 – Elementos de suprimentos.....	118
Tabela 12 – Pontos de origem e destino	118
Tabela 13 – Matriz origem-destino (OD).....	120
Tabela 14 – Tempo de percurso das rotas no modelo de equilíbrio (segundos)	122
Tabela 15 – Custo generalizado do status quo por rota (i) agregado; (ii) desagregado.....	123
Tabela 16 – Medição da variabilidade do tempo na Dom Luís e Santos Dumont	125
Tabela 17 – Medição da variabilidade do tempo de todos os trechos (em minutos).....	126
Tabela 18 – Gradação da confiabilidade.....	126
Tabela 19 – Constantes da variável resposta.....	127
Tabela 20 – Gradação do risco	127
Tabela 21 – Classificação dos arcos de maiores e menores riscos	128
Tabela 22 – Arcos escolhidos para os cenários	129
Tabela 23 – Rotas que trafegam pelo Arco 17	131
Tabela 24 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 17)	131
Tabela 25 – (i) custo generalizado desagregado.....	132

Tabela 26 – Rotas que trafegam pelo arco 47	133
Tabela 27 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 47)	133
Tabela 28 – Custo generalizado desagregado do par (42,01)	134
Tabela 29 – Rotas que trafegam pelo Arco 62	134
Tabela 30 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 62)	134
Tabela 31 – Rotas que trafegam pelo Arco 19	135
Tabela 32 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 62)	135
Tabela 33 – (i) risco total das rotas; (ii) custo generalizado desagregado da rota.....	137
Tabela 34 – Risco versus custo generalizado (Par 06-20)	138
Tabela 35 – Risco versus custo generalizado (Par 30-01)	138
Tabela 36 – Atributos dos arcos	139
Tabela 37 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Totais)	140
Tabela 38 – Tempo de viagem por rota (em segundos).....	140
Tabela 39 – (i) variância do tempo de viagem (minutos); (ii) custo generalizado desagregado da rota.....	141
Tabela 40 – Confiabilidade versus custo generalizado (Par 06-47)	142
Tabela 41 – Confiabilidade versus custo generalizado (Par 30-20)	142

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

BPR – *Bureau of Public Roads*

CTAFor – Controle de Tráfego em Área de Fortaleza

DECOPE – Departamento de Custos Operacionais, Estudos Técnicos e Econômicos

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DPVAT – Seguro de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres

ERP – *Enterprise Resource Planning*

FISTEL – Fundo de Fiscalização das Telecomunicações

GRIS – Gerenciamento de Riscos

HCM – *Highway Capacity Manual*

IPVA – Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

MPA – Modelo de Previsão de Acidentes

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

NRI – Índice de Robustez da Rede

NRI-m – Índice de Robustez da Rede-modificado

NTC – Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística

OD – Origem-Destino

PBT – Peso Bruto Total

RCTR-C – Responsabilidade Civil do Transportador Rodoviário de Carga

RCF-DC – Responsabilidade Civil Facultativa Desvio de Carga

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SUE – *Stochastic User Equilibrium*

TLC – Teorema do Limite Central

VUC – Veículo Urbano de Carga

ZRC – Zona de Restrição de Circulação

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório discorre acerca da contextualização do objeto de estudo e a descrição do problema da pesquisa. O problema que motivou a pesquisa será apresentado, posteriormente as questões de pesquisa, os objetivos do trabalho e as justificativas serão apresentadas, ou seja, a relevância de sua contribuição. Após a justificativa, designa-se a estrutura, em capítulos, para o trabalho.

1.1 Contextualização

Os problemas de mobilidade urbana estão relacionados, dentre outros, à distribuição espacial das atividades, ao crescimento expressivo do uso do automóvel, associado a um sistema deficiente de transporte público e a ocorrência de impactos negativos provocados pelas atividades de movimentação de cargas nas áreas adensadas (SANCHES JÚNIOR, 2008), cujos impactos ocasionados pelo trânsito possuem maiores proporções (sociais, econômicas e ambientais).

Melo (2011) destaca que a concentração populacional nas cidades confere aos centros urbanos papel de núcleos de consumo, que devem ser abastecidos continuamente a partir de fluxos de natureza e origem muito diversas. Apesar de tamanha relevância, a discussão sobre distribuição de carga urbana tem ocupado um lugar secundário dentre as prioridades de planejamento conduzido pelas autoridades (MUÑUZURI *et al.*, 2005; MACÁRIO *et al.*, 2006; QUACK; DE KOSTER, 2008).

A rede de transportes representa uma conjunção de vias e interseções responsáveis pelo movimento de pessoas e mercadorias. Tal conceito permite o acesso ao trabalho e lazer em áreas urbanas, além do desenvolvimento econômico rural através da conexão com áreas remotas (D'ESTE E TAYLOR, 2001). Apesar da importância do seu desempenho, uma rede de transportes não é plenamente confiável, haja vista que está sujeita a eventos intempestivos que podem resultar em atrasos no transporte, isolamentos de centros e outros danos à economia da região a qual está inserida.

No âmbito do transporte de mercadorias, atividade componente da logística, o desempenho da rede de transportes tem obtido destaque como fator indutor de custos para o agente transportador. No cenário nacional, estima-se que os custos logísticos (combustíveis,

lubrificantes, pneus, mão de obra etc.) apresentem proporções em torno de 12% do Produto Interno Bruto (PIB) conforme salientam Martel e Vieira (2010). No contexto do transporte urbano, em decorrência da complexidade das relações de distribuição da mercadoria, a proporção do custo logístico para o PIB é ainda superior.

No cenário urbano a complexidade existente a partir da interação entre diversos atores conflituosos e do papel de ser um dos sustentáculos do desenvolvimento da civilização moderna tornam o transporte de carga um elemento essencial para compreensão e análise de suas características. Ogden (1992) contribui ao elucidar que o próprio conceito de urbanização requer um sistema de transporte para sustentá-lo.

Infelizmente, nas zonas urbanas as ações políticas realizadas no tocante do transporte de carga são muito limitadas (ORTUZA & WILLUMSEN, 2011). Elas se relacionam, principalmente, nos controles sobre a carga/descarga, no tamanho dos veículos autorizados a circular em determinadas áreas, na organização do tráfego de veículos pesados, encargos especiais etc.

Pode-se esperar que as escolhas feitas para a movimentação de cargas devem seguir uma racionalidade econômica por si só: minimizar uma combinação tempos de viagem e custos adequados ao valor das mercadorias transportadas. Neste caso, o "valor dos bens" não é apenas quanto custa, mas quais são as implicações de sua chegada atrasada ou precoce em termos de custos de armazenagem e de produção/vendas atrasadas. No entanto, uma observação dos fluxos reais encontra muitos exemplos em que esta racionalidade econômica parece ser difícil de interpretar ou é muito mais complexa do que se esperaria.

Nesse tocante, tem-se considerado o transporte de cargas como importante objeto de estudo no campo da modelagem com o propósito de compreender seus componentes, em especial os custos associados à distribuição de mercadorias e como eles estão inseridos no fenômeno do transporte de carga.

Desta forma, os modelos existentes aplicados ao transporte urbano de cargas, buscam representar fenômenos ou solucionar problemáticas através da otimização, tal como: problemas de rotas em redes de transporte, problemas de localização de facilidades, previsão da demanda, gerenciamento da oferta, entre outros no campo da pesquisa operacional. Nesse tocante a identificação e representação dos custos, sob a forma de impedâncias, é uma atividade importante ao processo de modelagem.

Cascetta (2009) enumera alguns dos elementos constituintes dos custos logísticos que devam ser considerados no processo de modelagem, tais como: custos associados à gestão da encomenda, custos de transporte (as taxas de serviços de transporte), custos de perdas e

danos, custos de capital imobilizado durante o transporte, custos de atrasos e custos de insegurança.

Nesse contexto, a dificuldade de controlar, ou medir, as variáveis como tempo e custo generalizado vêm sendo discutida através dos conceitos de confiabilidade, risco e vulnerabilidade. Berdica (2002, *apud* OLIVEIRA, 2012, p. 25), exprime o conceito de vulnerabilidade como “a suscetibilidade a incidentes que podem reduzir consideravelmente a capacidade de oferecer serviço dessa rede”. Tal concepção usufrui de uma análise das probabilidades de ocorrência de condições adversas nos *links* da rede modelada.

A confiabilidade, no entanto, busca medir a variabilidade do tempo de viagem de cada arco da rede, no intuito de classificar as zonas quanto à variância em torno do tempo médio despendido. Tal conceito atualmente é utilizado em campos como: análise de tráfego entre dois pontos de uma rede de transportes, desenvolvimento de rotas para evacuação pós-desastres em um centro urbano e análise da relevância dos arcos da rede para redução dos congestionamentos, de forma que os arcos menos confiáveis sofram ações preventivas ou sejam inclusos em planos de contingência.

Para efeito deste trabalho, busca-se associar o indicador de confiabilidade com modelos de escolha de rotas, onde influirá no roteiro não apenas o tempo de viagem, mas também o quanto esse tempo é confiável para o transportador. Destarte, a depender do cliente, pode-se optar por rotas de maior tempo médio de viagem, contudo mais vantajosas por possuírem maior confiabilidade, ou seja, onde o trajeto tem maior probabilidade de ser realizado no período planejado. O mesmo raciocínio se aplica ao risco, onde pretende analisar de que forma esse atributo está inserido nas rotas que buscam minimizar o tempo de viagem e como ele poderá influenciar nessa escolha.

Os custos não monetários, pela sua natureza, podem representar sacrifícios aos operadores logísticos no decorrer da execução do serviço. Sacrifícios não monetários como: tempo e oportunidade podem ser mais significativos, inclusive, do que o preço monetário do transporte. Estimar, por exemplo, a confiabilidade, o risco e a vulnerabilidade associados à rota escolhida entre diversos pontos de origem e destino pode representar mudança na tomada de decisão. Conforme o custo incorrido em uma rota de maior risco, maior variabilidade no tempo de viagem, ou mais vulnerável à incidentes, supere o custo projetado de uma rota de otimizada pelo tempo (baseada no caminho mínimo), tal decisão pode ser reavaliada.

Brömmelstroet e Bertolini (2011) advertem que diversos modelos que buscam representar o estado da arte no contexto do transporte urbano desenvolvidos na academia, ou por consultores, não são utilizados pelos planejadores de transporte devido à falta de transparência no controle das variáveis. Há, com isso, lacuna para um aprofundamento no estudo dessas variáveis, em especial não monetárias, de forma a refletir a realidade com maior exatidão.

Diante disso, a literatura especializada composta por autores como: Taylor *et al.* (2006), Chen *et al.* (2012), Jenelius *et al.* (2012), Knoop *et al.* (2012), Scott *et al.* (2006), Snelder *et al.* (2012) entre outros, busca investigar os atributos de desempenho da rede de transporte como forma de otimizar os custos, específicos ou generalizados, oriundos da sua utilização e, sobretudo, modelá-los de forma que representem uma situação real dada a ocorrência de evento na rede de transportes.

1.2 Problema e Questões de Pesquisa

A motivação da pesquisa consiste em investigar as relações entre confiabilidade, vulnerabilidade e risco com a escolha de rotas do transportador de carga, no caso, um dos atores do sistema de transporte. Dessa maneira, busca-se desenvolver um método que incorpore na modelagem da escolha de rota os atributos de confiabilidade, vulnerabilidade e risco cujo resultado represente redução no custo generalizado para o transportador ou em uma melhor qualidade de entrega da mercadoria.

Nesse tocante, parte-se da premissa que ao desenvolver o modelo que incorpore os efeitos da confiabilidade e risco dos arcos de um sistema de transportes acarretará em redução do custo generalizado, uma vez que o transportador poderá adotar rotas de maior confiabilidade, ou incorporará planos de contingência para rotas de maior risco.

Consoante à identificação preliminar do problema, evidenciou-se um questionamento central de caráter científico acerca deste e, com isso, um encadeamento de questões específicas que buscam englobar incertezas menores, porém alinhadas com a questão central. Tal etapa, cuja explanação de forma sistematizada e concisa, possui o desígnio de referenciar, ou induzir, a concepção do objetivo geral, e específicos, da pesquisa.

Deste modo, para efeito desta dissertação, partiu-se da seguinte indagação central: aplicar o conceito de vulnerabilidade, introduzindo algoritmos de confiabilidade e risco, na modelagem de escolha de rotas contribuirá para a redução dos custos generalizados para o transportador?

Sistematicamente, a questão central é desdobrada em questionamentos específicos, de menor abrangência:

- a) como inserir atributos de confiabilidade e risco no modelo de escolha de rotas?
- b) a confiabilidade e o risco dos arcos são direcionadores eficazes da vulnerabilidade da rede?
- c) qual a relação entre os componentes do custo generalizado com os conceitos de confiabilidade, vulnerabilidade e risco?
- d) como expressar o custo generalizado, por meio dos conceitos de confiabilidade, e risco no processo de modelagem dos custos logísticos no transporte de cargas em áreas urbanas adensadas?
- e) é propício inserir a vulnerabilidade no processo de escolha da rota em contexto urbano?

1.3 Objetivos

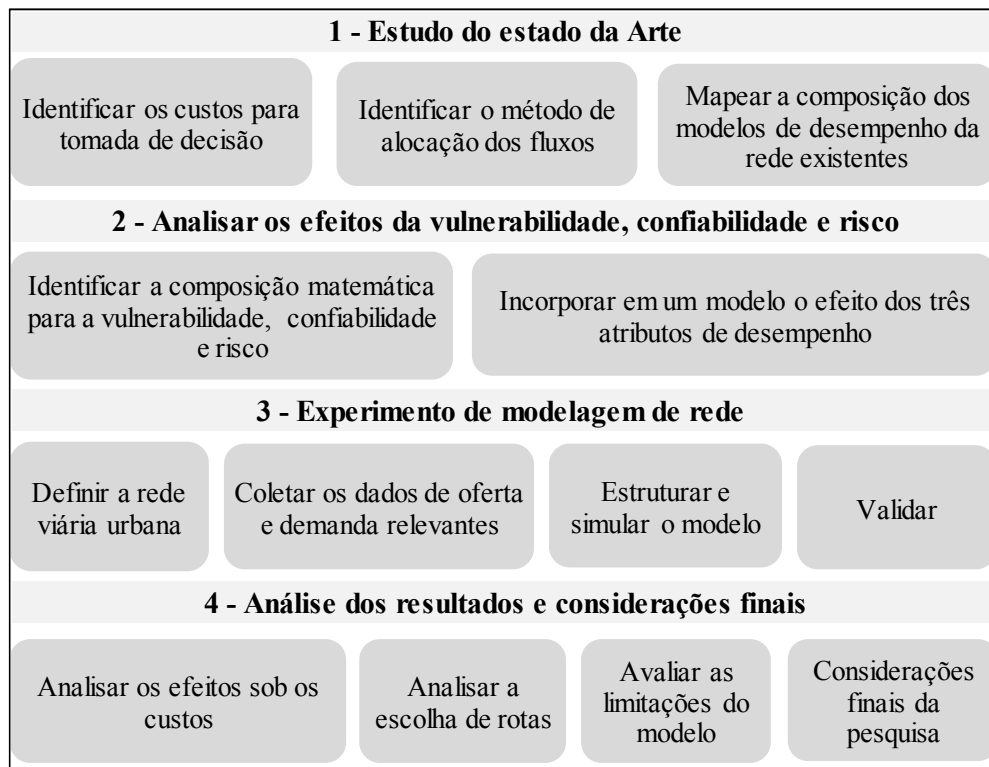
O presente estudo tem como objetivo geral representar o custo generalizado, incorporando o conceito da vulnerabilidade, da confiabilidade e do risco de uma rede viária urbana para tomada de decisão quanto à escolha de rota no transporte de carga. Em complementação, são formulados os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar e selecionar quais custos são considerados na tomada de decisão quanto a escolha de rota em área urbana adensada, pelo transportador de carga;
- b) verificar como o conceito de confiabilidade, vulnerabilidade e risco em termos de desempenho da rede, influem na representação do custo logístico;
- c) verificar a eficácia da confiabilidade e do risco como conceitos para obtenção da vulnerabilidade da rede;
- d) verificar a eficiência da escolha de rota, ponderando o risco e a confiabilidade, em relação às representações que adotam o caminho mínimo.
- e) verificar a relevância do uso da vulnerabilidade no processo de escolha da rota em contexto urbano.

1.4 Método

O método proposto se fundamenta em um fluxo lógico de etapas, ou atividades, necessárias para a realização da pesquisa. Neste capítulo cada sub-etapa metodológica será descrita, enaltecendo a sua contribuição de forma sistêmica para o todo. A Figura 1 ilustra as etapas.

Figura 1 – Estrutura sistematizada do método proposto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse contexto a abordagem metodológica utilizada nesta pesquisa é composta por quatro etapas: (i) estudo do estado da arte; (ii) análise dos efeitos da confiabilidade, vulnerabilidade e risco; (iii) experimento de modelagem de rede e (iv) análise dos resultados e considerações finais. Cada categoria possui etapas menores e complementares visando cumprir os objetivos da pesquisa.

1.4.1 Estudo do estado da arte

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica para identificar na literatura especializada o que os autores abordam acerca de modelagem aplicada ao transporte de cargas e alocação dos fluxos, fundamentando, para isso, a teoria dos grafos.

Busca-se também o estado da arte acerca dos algoritmos de confiabilidade, vulnerabilidade e risco, além de custos monetários e não monetários na logística. Destarte, segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica

[...] é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. [...] A principal vantagem da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente. (GIL, 2008, p.50).

Nesse tocante, a pesquisa bibliográfica advém da necessidade de levantar e estruturar, mediante o estado da arte, os diferentes temas componentes do objeto de estudo, propiciando um embasamento teórico inicial necessário para o prosseguimento das etapas metodológicas subsequentes.

Isto posto, realizar-se-á a identificação dos custos utilizados no processo de tomada de decisão no transporte de carga. Subsequentemente será estudada a relevância do custo não monetário (ex. tempo) para o agente transportador. Nesta etapa, também serão analisadas e comparadas as funcionalidades e composição dos modelos vigentes, baseados no caminho mínimo, em termos de representação do transporte de carga.

1.4.2 Analisar os efeitos da Confiabilidade, Vulnerabilidade e Risco

Nesta etapa metodológica, propõe-se analisar os efeitos dos atributos de desempenho dos arcos da rede no transporte de carga. Para isso, será realizado um aprofundamento da pesquisa na literatura intrinsecamente acerca de confiabilidade, vulnerabilidade e risco no transporte.

Diante disso, tais atributos serão inseridos no modelo de escolha de rota. As atividades pertinentes ao método consistem em: (i) identificar a composição matemática inerente aos atributos de desempenho da rede (confiabilidade, vulnerabilidade e risco); (ii)

identificar métodos para coleta dos dados; (iii) verificar a inserção dos três atributos de desempenho em modelos de escolha de rota na rede de transportes.

1.4.3 Experimento de modelagem de rede

A etapa experimental da modelagem se inicia com a definição da rede e coleta dos dados referente aos diversos atributos e impedâncias analisadas.

Conforme identificação dos custos e composição dos atributos de desempenho viário, a Etapa 3 consiste na parte experimental da dissertação. As atividades envolvidas consistem em: (i) estruturar o modelo (rede, dados de oferta/demanda, impedâncias etc.); (ii) realizar simulação de cenários (falhas em arcos para mensurar os custos); (iii) validar o modelo através de comparações de custos de rotas com os modelos de escolha de rota consolidados na literatura.

1.4.4 Análise dos resultados e considerações finais

Finalmente, na Etapa 4, explicitar-se-á as considerações finais da pesquisa, em que se analisa os resultados finais considerados relevantes. “Em termos formais, é uma exposição factual sobre o que foi investigado, analisado, interpretado; é uma síntese comentada das ideias essenciais e dos principais resultados obtidos, explicitados com precisão e clareza.” (LAKATOS, 2003, p. 171).

Desta maneira, as atividades envolvidas são:

- a) avaliar a confiabilidade e risco como atributos direcionadores da vulnerabilidade;
- b) analisar os efeitos da confiabilidade (em termos de custos e qualidade da entrega do transportador);
- c) analisar os efeitos do risco (em termos de custos e qualidade da entrega do transportador);
- d) avaliar as limitações do modelo;
- e) considerações finais da pesquisa.

1.5 Relevância do tema e originalidade

Historicamente, o transporte de carga sempre teve relevância capital para o desenvolvimento da sociedade urbana. Nenhuma área urbana poderia existir sem um massivo, confiável e sustentável fluxo de mercadorias direcionado a elas e dentro delas, conforme ressalta Caixeta-Filho e Martins (2010, p. 97).

Os estudos baseados em modelos de escolha de rotas no transporte de carga são amplos e consolidados na literatura existente, no entanto, em suma, associados ao tempo e distância em redes carregadas e não carregadas. Ao analisar a vertente relacionada à confiabilidade da rota, o risco de falhas e o impacto resultante, observa-se uma lacuna no conhecimento quanto à profundidade dos estudos e da aglutinação desses atributos no processo de modelagem.

A relevância deste estudo decorre do fato de a confiabilidade, vulnerabilidade e risco da rede viária serem atributos complementares, porém pouco explorados juntos no transporte urbano de cargas, especificamente em modelos de escolha de rotas. À vista disso, há uma evidente necessidade de se ter maior aprofundamento e estudos.

Pretende-se também, contribuir com a temática da modelagem do transporte de cargas sob a perspectiva do transportador, em especial, identificar em quais situações é vantajoso priorizar a confiabilidade na escolha do percurso. Salienta-se, por fim, que a pesquisa realizará uma articulação teórico-prática a respeito de fatores que afetam a tomada de decisão na gestão do transporte de cargas.

1.6 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- a) capítulo 1: introduz-se a problemática que motivou a pesquisa, apresenta os objetivos geral e específicos, assim como a metodologia empregada;
- b) capítulo 2: neste capítulo, pretende-se sintetizar os aspectos teóricos e metodológicos das categorias que servirão de sustentáculo para a pesquisa. Dessa maneira, dar-se-á ênfase na abordagem dos conceitos de rede de transportes e atributos de desempenho;

- c) capítulo 3: serão discutidos os principais métodos de alocação da demanda na rede viária e analisado qual melhor representa o fenômeno do transporte urbano da carga;
- d) capítulo 4: discorre acerca da confiabilidade, vulnerabilidade e risco de uma rede viária, assim como a classificação dos distúrbios e a aplicabilidade em modelos;
- e) capítulo 5: detalha a metodologia para representação do custo generalizado utilizada neste trabalho;
- f) capítulo 6: aplicação e análise do experimento, adotando a metodologia proposta no Capítulo 5;
- g) capítulo 7: são apresentadas as conclusões.

Cada capítulo se inicia com a manifestação básica do conteúdo a ser abordado. Ao final, serão trabalhadas as considerações do capítulo, ou seja, apresentadas as contribuições do raciocínio exposto para o método da dissertação.

2 REDE DE TRANSPORTES: PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICO

Neste capítulo, sintetizam-se os aspectos teóricos e metodológicos das categorias que servirão de sustentáculo para a pesquisa. Nessa conjectura, dar-se-á ênfase na abordagem dos conceitos de sistema de transporte e atributos de desempenho com foco no transporte da carga.

2.1 Sistemas de transporte

Conforme o notório processo de globalização e crescimento econômico observado nas últimas décadas, o sistema de transporte tem se desenvolvido e ganhando relevância na mesma cadência. Vivaldini e Pires (2010) ressaltam que em diversos setores industriais as atividades de transporte representam a maior fração em termos de custos logísticos, sobrepujando os custos de manter os estoques.

Um sistema de transporte pode ser definido como um conjunto de elementos, que interagem entre si, produzindo demanda mútua por viagens dentro de uma determinada região. Tais interações, requerem a prestação de serviços de transporte para atendê-las (CASCETTA, 2009).

O sistema de transporte advém de uma relação contínua entre oferta e demanda, onde o produto dessa interação é o desempenho do sistema ou nível de serviço. Dessa maneira, o desempenho da rede serve para caracterizar o serviço que ela oferece. Tais serviços devem fornecer meios para a movimentação de passageiros e mercadorias para lugares diferentes e em momentos diferentes (CHEN *et al.*, 2006).

O sistema de atividades interage diretamente com o sistema de transporte. Ainda segundo Cascetta (2009) um sistema de atividades representa o conjunto de comportamentos individuais, sociais e econômicos e suas interações que dão origem a demanda por viagens. Estes atributos fazem do sistema de atividades um componente de constante transmutação cuja interação com o sistema de transporte eleva a complexidade do fenômeno. Na apreciação de

Ortúzar e Willumsen “o sistema de atividades, por si só, seria provavelmente alterado à medida que o nível de serviço muda ao longo do tempo e espaço” (2011, p. 7, tradução nossa)¹.

Existem dois fenômenos complementares dentro do sistema de transporte: o sistema de transporte de carga e o sistema de transporte de passageiros. O primeiro apresenta diferenças significativas quando relacionado ao sistema de transporte de passageiros.

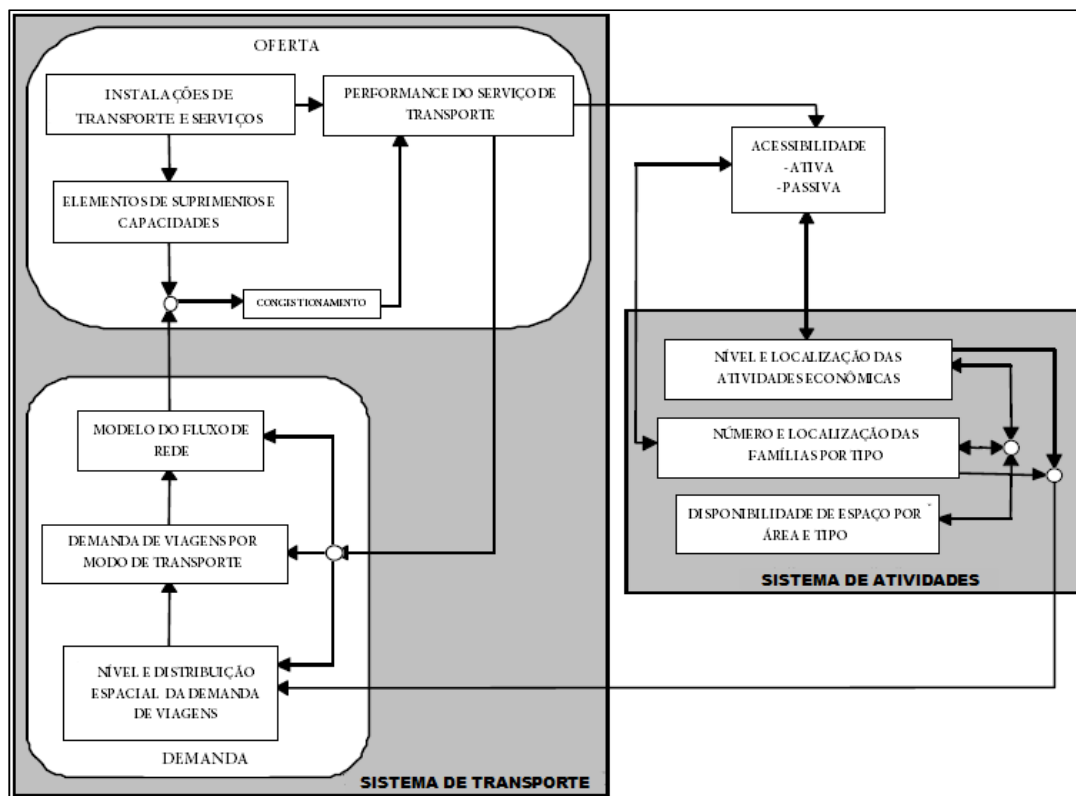
Estudos regionais e internacionais tendem a cobrir com uma abordagem simplificada as mudanças da modelagem na tomada de decisão logística. Fatores como os fluxos comerciais, a escolha de modos e de rota são focos de atenções. Perante estes fatos, salienta-se que menos pesquisas foram realizadas na modelagem do transporte urbano de carga do que o esforço alocado para a demanda de passageiros. Por que isso seria o caso? Para Ortuzar e Willumsen (2011) há muitos aspectos inerentes a demanda de carga que a torna mais difícil de modelar do que os movimentos de passageiros; alguns destes são discutidos abaixo:

- a) por algum tempo, o congestionamento urbano tem sido maior na agenda política da maioria dos países industrializados e neste campo passageiros desempenham um papel mais importante do que o frete;
- b) o movimento de mercadorias envolve mais atores do que o movimento de passageiros; temos a empresa industrial ou empresas de envio e recebimento de mercadorias, os carregadores que organizam a remessa e modos, a transportadora para realizar o movimento e vários outros que executam o transbordo, armazenamento e instalações personalizadas. Em alguns casos, dois ou mais deles podem coincidir, por exemplo, em operações por conta própria, onde há sempre espaço para objetivos conflitantes que são difíceis de modelar em detalhes na prática;
- c) as tendências recentes na pesquisa de transporte de cargas têm enfatizado o papel que ele desempenha no processo global de produção e controle de estoque. Essas tendências se originam de técnicas de modelagem de passageiros, mais tradicionais, mas que possuem pouco em comum com a carga.

Entretanto, no âmbito das variáveis de operação, segurança e motivação, observam-se propósitos distintos, contudo quando se relaciona ao nível de serviço muitos dos parâmetros do sistema de transporte de passageiros são semelhantes, se não idênticos, aos do sistema de transporte de carga (SUSSMAN, 2000).

¹ Traduzido do inglês: the activity system itself would probably change as levels of service change over space and time.

Figura 2 – Relação entre sistema de transporte e sistema de atividades



Fonte: Cascetta (2009).

A Figura 2 ilustra a associação existente entre o sistema de transporte e o sistema de atividades. A disposição dos aspectos econômicos e sociais do sistema de atividades induz à demanda por transporte, ou viagem, em determinada região. Tal efeito indutor de demanda gera a necessidade de uma estrutura de transporte cuja oferta seja compatível à demanda. Assim, caso a oferta seja superior à demanda, ocorrerá em capacidade ociosa do sistema e caso a oferta seja inferior resultará em congestionamento da rede.

Cole (2005) colabora com essa análise, ao relacionar o sistema de atividades com o transporte de carga. Para o autor:

A demanda por transporte público, fretes rodoviários de mercadorias ou serviços aéreos geralmente são derivados de alguma outra função. A empresa produtora de roupas ou alimentos vê o transporte como um meio de mover seus produtos da fábrica ou armazém para a loja de varejo. À medida que a demanda por produtos aumenta a demanda por transporte irá crescer. (COLE, 2005, p. 5, tradução nossa).²

² Traduzido do inglês: Demand for public transport, road freight facilities or airline services is usually derived from some other function. A company producing clothes or food sees transport as a means of moving its products

Nesse tocante, argumenta-se que a realização dessas viagens ou do transporte de cargas implica custos aos agentes envolvidos. Para efeito desta pesquisa, entendem-se como custos, as impedâncias de caráter monetário e não monetário que estão constituintes em um dado modelo.

No tocante ao desempenho, observa-se que está intimamente relacionada aos elementos de suprimentos da rede (como capacidade dos arcos) e ao modelo de fluxo de rede (oriundo da distribuição espacial da demanda de viagens e da demanda por modo de transportes). Tal desempenho dita o nível de acessibilidade da rede tanto para transporte de carga quanto para o transporte de passageiros.

Cole (2005) discute acerca dos fatores determinantes dessa demanda por viagens. Segundo o autor geram influência na escolha de rota, ou de modo, pelo usuário, dentre outros, os seguintes aspectos:

- a) características físicas do produto: cujos atributos influenciam no planejamento da distribuição do produto, escolha de rotas e modo;
- b) preço: onde o nível dos custos do transporte, de passageiros ou cargas, é um elemento determinante para alocação das viagens;
- c) preços relativos cobrados por diferentes operadores: dada a mesma qualidade de serviço entre concorrentes a empresa com o menor preço é susceptível de obter o contrato;
- d) renda dos passageiros: a quantidade de viagens varia em decorrência da renda da população, a depender do efeito da elasticidade essa relação é maior ou menor;
- e) confiabilidade: relaciona-se a variabilidade do tempo de viagem, especificamente, com o tempo de viagem esperado pelo usuário;
- f) segurança ou risco: vinculado à confiabilidade, refere-se a eventos de perigo que possam comprometer a viagem do usuário.

Para o transportador a análise desses custos é realizada para fundamentar o processo de tomada de decisão. Isso posto, são desenvolvidos modelos de representação de custos que busquem simular e/ou otimizar, o custo total do transporte na rede.

A modelagem de custos associada ao transporte de carga, em sua magnitude, envolve os problemas de localização de facilidades e de rota. Para conseguir representar tais

from factory or warehouse to the retail store. As the demand for products increases so the demand for transport facilities will increase.

situações é necessário lançar mão da identificação dos custos mais representativos ao fenômeno e mensurar suas variáveis.

Hamad e Gualda (2011) propuseram um modelo de localização a partir do levantamento dos custos monetários totais de transporte para abastecimento em cada ponto da cadeia de suprimentos. Syam (2002) desenvolveu um modelo de localização alicerçado no conceito de *cycle time*, ou tempo de ciclo das transferências entre instalações. Esse modelo ao introduzir o conceito de tempo de ciclo de transferências torna a considerar um componente de custo não monetário no cálculo da função objetivo. Agrega-se, dessa forma, relevância na decisão de localização das instalações.

O desígnio de determinar a rota ótima entre diversos pontos distribuídos em determinada rede, motivou diversos autores a desenvolverem modelos de escolha de rotas (ver Capítulo 3). Vieira *et al.* (2012) desenvolveram um modelo de programação linear de caminho mínimo cujas variáveis se baseiam no levantamento dos custos das rotas e custos dos veículos. Santos e Leal (2007) propuseram um modelo de roteirização baseado em algoritmos de colônias de formiga, tendo como objetivo a otimização de custos de rotas e janelas de veículos em determinada região.

Para ambos os problemas de pesquisa operacional (localização de facilidades e caminho mínimo) a identificação e análise dos custos monetários e também dos custos não monetários, são sustentáculos necessários para o desenvolvimento dos modelos.

2.1.1 Custos

O estímulo econômico às negociações internacionais redescobriu a atividade de serviços logísticos como de fundamental importância na estratégia das empresas e no desenvolvimento do país. A afirmação corrobora com a visão de Custódio e Filho (2005), o qual denota a importância dos prestadores de serviços logísticos para a otimização dos custos em toda a cadeia produtiva e na melhoria do nível de serviço.

O custo se refere à sacrifícios com os quais uma entidade precisa arcar para atingir seus objetivos, tais como a utilização de um produto ou serviço visando a obtenção de outros bens ou serviços. Os custos podem ser classificados em dois aspectos: monetário e não monetário. Na logística, especificamente no transporte de carga, o custo monetário se refere aos sacrifícios financeiros despendidos como: frete, seguro, capital investido, manutenção, salários,

encargos e combustível. Ao passo em que o custo não monetário alude aos componentes que à priori não são convertidos em valores monetários como: tempo e risco.

No contexto atual, nota-se que os custos não monetários como o tempo e o risco presente na rede de transporte são elementos inerentes no cotidiano dos agentes transportadores. Os fatores de risco como: acidentes na via, roubos ou defeitos podem significar em prejuízos superiores aos custos tradicionais. Da mesma forma, o tempo é um componente cuja variabilidade interfere no desempenho ou nível de serviço dos transportadores. Para Sussman (2000), o custo associado à travessia de um *link* pode ser considerado pelo o tempo de passagem, ou por variáveis mais explícitas como: pedágios existentes ou taxas ambientais.

No campo da pesquisa operacional, na programação linear, os custos aparecem sob a forma de impedâncias do modelo, onde a função objetivo é minimizar o custo total. Samed e Mendes (2011) desenvolveram um modelo de localização de facilidades baseado no custo de transporte de mercadorias entre clientes e fornecedores. No entanto variáveis não monetárias como risco ou tempo não foram levantadas. Kawamoto (1999, *apud* SANTOS *et al*, 2004) afirma que no transporte de cargas, existe uma predominância dos custos monetários, diferentemente do que ocorre no transporte de passageiros, em que os chamados custos subjetivos, tais como tempo de viagem, conforto, segurança, dentre outros, se sobressaem. A afirmação do autor evidencia uma lacuna quanto ao estudo dos custos não monetários no transporte de cargas.

Devido a rede de transportes possuir uma estrutura de oferta fixa (com crescimentos escalonados), a análise da capacidade das vias, ou da rede como um todo, é necessária para estimativas de congestionamentos e outros fatores impulsionadores de custos. O que será abordado no tópico seguinte.

2.1.2 Capacidade

Viagens de um ponto a outro, com frequência envolve a utilização sucessiva de várias instalações ou serviços conectados. Para Cascetta (2009) a oferta de transporte é composta de:

- a) instalações (estradas, estacionamentos, linhas ferroviárias, etc.);
- b) serviços (linhas de trânsito e horários);
- c) regulamentos (circulação rodoviária e regulamentos de estacionamento);
- d) preços (tarifas de trânsito, os preços de estacionamento, pedágios, etc.).

As instalações de transporte normalmente possuem uma capacidade finita, ou seja, um número máximo de usuários que podem utilizá-las em um determinado intervalo de tempo. Dessa forma, salienta-se a figura da demanda como alicerce do planejamento da capacidade de uma rede. Estuda-se a demanda por viagens no intuito de compreender o comportamento do fluxo de veículos no estado atual, simulando cenários a fim de prever o comportamento desse fluxo no futuro e analisar a utilização da capacidade das vias.

Nesse tocante, o atributo de desempenho diretamente relacionado à capacidade é o congestionamento. Para Ortuzar e Willumsen (2011)

Uma das características mais importantes da oferta de transporte é o congestionamento. (...) O congestionamento ocorre quando os níveis de demanda se aproximam da capacidade de uma instalação e o tempo necessário de utilização (viagem através delas) aumenta bem acima da média. (...) No caso da infraestrutura de transporte a inclusão de um veículo adicional gera atraso suplementar para todos os outros usuários. (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011, p. 5, tradução nossa).³

Sendo assim, estudar o comportamento da demanda por viagens e do seu impacto (em forma de congestionamentos) permite identificar um melhor dimensionamento da capacidade.

De acordo com Oliveira (2012) a capacidade normalmente é expressa em Unidades de Carro de Passeio (UCP) por hora, mediante a conversão das diversas categorias de veículos existentes no fluxo para equivalentes em carros de passeio. A estimativa correta da capacidade de uma via é, então, um dos alicerces básicos nas etapas do planejamento de transporte.

Ainda segundo o autor, utiliza-se o *Highway Capacity Manual* (HCM, 2010) como meio mais usual para estimar a capacidade de um *link* rodoviário, sendo o padrão para estimativa de capacidade no Brasil. O HCM se trata de um manual com diretrizes e procedimentos computacionais para calcular a capacidade e qualidade de serviço de vários elementos da rede, incluindo autoestradas, rodovias, vias arteriais, cruzamentos sinalizados e não sinalizados, estradas rurais e os efeitos do transporte de massa, pedestres e bicicletas sobre o desempenho desses sistemas.

³ Traduzido do inglês: One of the most important features of transport supply is congestion. (...) Congestion arises when demand levels approach the capacity of a facility and the time required to use it (travel through it) increases well above the average. (...) In the case of transport infrastructure the inclusion of an additional vehicle generates supplementary delay to all other users as well.

O primeiro HCM foi publicado em 1950 como uma *joint venture* entre o *Transportation Research Board* e o *Bureau of Public Roads*. Sucessivamente, edições seguintes foram publicadas mediante contribuições de múltiplas instituições. Em geral, na modelagem da rede de transportes, por adotar simplificações nos cálculos, o grau de detalhamento exigido pelo HCM o torna complexo de se adotar plenamente.

2.2 Desempenho

O desempenho de uma rede de transporte é um fator que vem apresentando relevância crescente para o planejador de transporte. A presença de congestionamentos é indicativa de desempenho aquém do ideal, contudo não é o único fator no qual se pode medir a eficiência de uma rede.

De acordo com o HCM (2010), o desempenho do sistema deve ser mensurado em mais de uma dimensão. Quando se analisa uma única interseção, tal ação pode ser suficiente para computar apenas atrasos no horário de pico. Entretanto, quando se analisa o sistema, então, a extensão geográfica, a duração dos atrasos e quaisquer outras mudanças na demanda entre as zonas e os modos deverão ser consideradas. Sendo assim, o HCM considera que o desempenho do sistema possa ser mensurado pelas seguintes dimensões:

- a) quantidade de serviço: mensura a utilização do sistema de transportes em termos do número de usuários que utilizam o sistema, a distância que eles percorrem e o tempo que eles necessitam para percorrer;
- b) intensidade do congestionamento: o tamanho do congestionamento experimentado pelos usuários do sistema (pode ser calculado por via da relação volume/capacidade, ou demanda/capacidade);
- c) duração do congestionamento: o número de horas que o congestionamento persiste;
- d) extensão do congestionamento: o comprimento físico do congestionamento (ou pode ser calculado pela percentagem de quilômetros congestionados da rede).

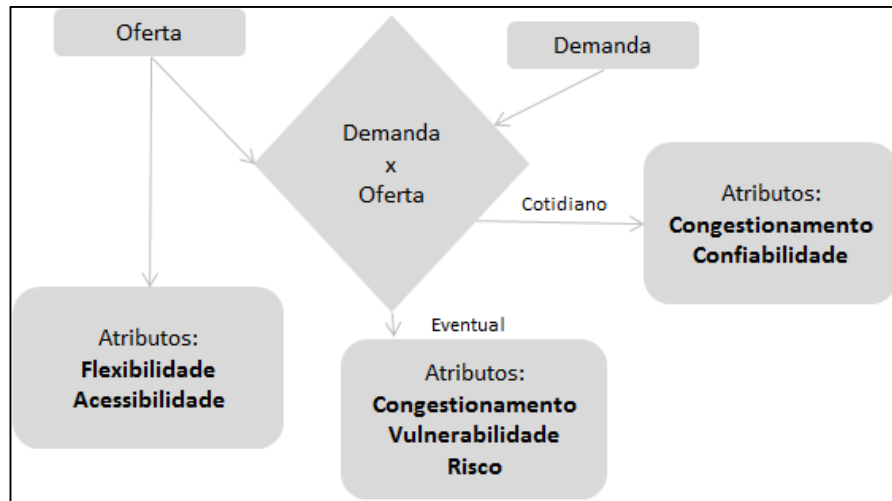
Apesar de estar presente na maior fração das análises relacionadas ao desempenho da rede viária, o congestionamento (que será abordado no Item 2.2.2) é apenas um dos atributos que se pode caracterizar a problemática de uma rede.

Incidentes como colisões, falhas em equipamentos semafóricos e obstruções na via podem comprometer um *link* e prejudicar o desempenho da via, com isso, o nível de serviço do transportador. Para Oliveira (2012) a vulnerabilidade, apesar de dissemelhante, é comumente

relacionada aos demais indicadores de desempenho de uma rede viária como: confiabilidade, flexibilidade, acessibilidade, congestionamento e risco.

Oliveira afirma que “vulnerabilidade é o atributo de desempenho relacionado ao impacto de eventos aleatórios não recorrentes ou de baixa recorrência em uma rede viária, capazes de comprometer a capacidade de um *link* ou grupo de *links*” (2013, p. 4). Trata-se, portanto, de medir o impacto que a obstrução total ou parcial de uma via reflete no desempenho da rede de transportes. A Figura 3 demonstra os atributos de desempenho do sistema oriundos a partir da relação de oferta e demanda.

Figura 3 – Atributos de desempenho do sistema



Fonte: Oliveira (2013).

A relação de equilíbrio entre oferta e demanda em uma rede de transporte é susceptível a ocorrência de incidentes. Os atributos servem para medir o desempenho do sistema. Para cada atributo são designados indicadores que fundamentam a análise.

Husdal (2004) advoga que o custo consequente da falha de um arco da rede de transporte não deve incluir apenas o número imediato de usuários presentes na via, mas também os custos socioeconômicos globais que incidem na comunidade cuja vulnerabilidade está impetrada. Chen *et al.* (1999) salientam a importância de estudos de confiabilidade dos arcos da rede de transporte na previsão de custos. Com a medida e análise da confiabilidade, tanto os custos de reparos da rede de transporte como os custos indiretos resultantes podem ter reduções substanciais.

Tais atributos exprimem a necessidade de identificar custos de ordem não monetária e monetária, onde através de modelos, são simulados tanto a resiliência da rede como os custos incorridos em cenários distintos para diversos atores envolvidos.

Pode-se encontrar na literatura estudos em modelos que simulem a confiabilidade e vulnerabilidade da rede de transportes e os impactos operacionais decorrentes da ocorrência de falhas em *links*, todavia, evidenciam-se lacunas na transformação desse impacto resultante da vulnerabilidade como o tempo excedente em custos monetários. A apropriação dessa informação é necessária ao desenvolver estratégias para planejamento de sistemas de rede capazes de se manter estáveis financeiramente em ambientes de pressão e risco.

2.2.1 Nível de serviço

Atividades econômicas diversas necessitam do transporte de mercadorias para o seu fomento. Tais mercadorias são movidas entre unidades de produção, distribuidores, residências e outros locais de “consumo final” (CASCETTA, 2009). Desta forma, a movimentação de veículos resultante compõe a demanda de viagens por cargas e fluxos de viagens correspondentes. A mobilidade, então, é influenciada pelo desempenho dos serviços de transportes percebido pelo usuário nos diversos modos disponíveis.

Tal conceito de desempenho, também pode ser compreendido como nível de serviço. Trata-se de atributos de desempenho que caracterizam o serviço da rede. Incluem por exemplo: o tempo de viagem, os custos monetários, a confiabilidade do serviço, o conforto da viagem e assim por diante (idem, 2009, p. 3). Por exemplo, a escolha do destino pode ser influenciada pelo tempo de viagem e os custos necessários para chegar a cada destino alternativo. Assim como a escolha da hora da partida depende do tempo de viagem para o destino e da hora de chegada desejada. Nessa conjectura, a escolha do modo de transporte pode ser influenciada pelo tempo, custo e confiabilidade dos serviços disponíveis.

Sussman (2000) salienta a complexidade envolvendo o conceito de nível de serviço. Para o autor, o nível de serviço é multidimensional, ou seja, não é somente mensurado por uma variável (como tempo ou confiabilidade). Trata-se de uma combinação de múltiplas variáveis, integrando o julgamento de pessoas, embarcadores, receptores, ou usuários em geral. Atores que possuem diferentes necessidades em relação à rede viária atribuirão diferentes julgamentos acerca do seu desempenho.

2.2.2 Atributo do congestionamento

O componente da oferta de transportes é composto por estruturas (rodovias, pontes, estacionamentos, linhas férreas), serviços (linhas de circulação, programações) e preços (taxas de circulação, pedágios, preço dos estacionamentos) e tais características concomitantemente ativas produzem oportunidades de viagens. Para tais viagens ocorrerem, utilizar-se-ão as estruturas e os serviços da rede. Estas últimas possuem uma capacidade finita de escoamento.

A quantidade de usuários utilizando uma via em determinado período de tempo, afetando o seu desempenho, constitui um congestionamento (CASCETTA, 2009). Para Oliveira (2013), o congestionamento se refere à fluidez do trânsito nas vias e ao nível de serviço oferecido pela rede. Trata-se de um dos atributos mais usuais no planejamento de transportes. Para Cascetta (2009),

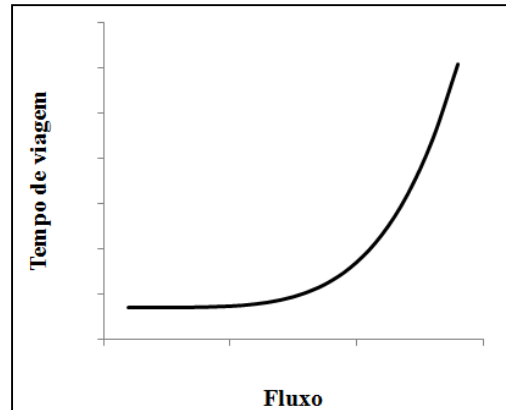
Quando o fluxo se aproxima da capacidade de uma determinada via (ex. trecho de uma rodovia), as interações entre os usuários aumentam significativamente e os efeitos do congestionamento se tornam importantes. O congestionamento em uma via pode afetar significativamente o nível de serviço percebido pelos usuários; por exemplo: tempo de viagem, atraso no serviço e consumo de combustível, todos aumentados pelo nível de congestionamento. (CASCETTA, 2009, p. 4, tradução nossa).⁴

Percebe-se que o congestionamento aglutina diversas impedências consideradas no planejamento e na modelagem da rede como: tempo de viagem, *delay* nos serviços e custo generalizado. Desta forma, “sendo o congestionamento o principal sintoma de mau desempenho de uma rede, é natural que *links* congestionados sejam o principal foco de análise quando se procura solucionar o correspondente problema de desempenho” (OLIVEIRA, 2013, p. 5).

Para Ortuzar e Willumsen (2011), o congestionamento surge quando o nível de demanda se aproxima ou excede a capacidade da via e o tempo necessário para utilizá-la aumenta bem acima da média, em comparação com condições de baixa demanda. No caso da infraestrutura de transportes o acréscimo de um veículo adicional gera aumento no tempo de locomoção para todos os usuários como um todo. Tal efeito é ilustrado na Figura 4.

⁴ Traduzido do inglês: when the flow approaches the capacity of a given facility (e.g., a road section), interactions among users significantly increase and congestion effects can become important. Congestion on a facility can significantly affect the level of service received by its users; for example, travel time, service delay, and fuel consumption all increase with the level of congestion.

Figura 4 – Congestionamento como função do tempo e do fluxo



Fonte: Elaborada pelo autor.

À medida que o fluxo de veículos em uma via aumenta, a capacidade ofertada existente no arco os acomoda sucessivamente (gerando aumento no tempo de viagem para todos os usuários). Ao atingir o limite da capacidade, o incremento marginal de um veículo gera aumento superior nesse tempo da viagem, acentuando a curva.

2.2.3 Atributo da acessibilidade

Assim como o congestionamento, a acessibilidade da via mede o funcionamento da rede. Na abordagem de Oliveira (2012) o atributo de desempenho da acessibilidade está relacionado com a capacidade de deslocamento do usuário entre zonas de uma região. Sendo analisado o tempo e o custo para se deslocar. Quanto menor for esse tempo e o custo do deslocamento, maior acessibilidade possui a rede viária.

Para Cascetta (2009) o desempenho do sistema de transportes influencia relativamente a acessibilidade entre diferentes zonas de uma área urbana ao determinar, para cada zona, o custo generalizado para atingir outras zonas da rede (acessibilidade ativa), ou de ser alcançado por outras zonas (acessibilidade passiva). Por essa razão, os elementos que compõem o sistema de atividades consideram o atributo de acessibilidade passiva quando optam por se localizarem em zonas de maior acessibilidade.

Nesse âmbito, Sohn (2005) elaborou um estudo acerca da degradação da acessibilidade de arcos da rede mediante interrupções causadas por inundações. O propósito fora aferir o quanto um evento natural de baixa probabilidade interfere no deslocamento dos usuários entre zonas dessa rede viária. Neste trabalho, cada arco, com o risco potencial de danos

causados pelas inundações, é bloqueado separadamente para cada rodada de cálculo da acessibilidade.

2.2.4 Atributo da flexibilidade

Esse atributo de desempenho pode ser visto como complementar ao da acessibilidade. À medida que o tempo e o custo para deslocamento de cargas e veículos entre zonas da mesma região são acessíveis, pressupõe-se que há uma vasta disponibilidade de arcos alternativos, ou que a rede está com fluxo de usuários abaixo da capacidade.

Por conseguinte, flexibilidade se relaciona à existência de rotas alternativas entre pares de origem e destino (OLIVEIRA, 2013). Ou seja, mede a flexibilidade da oferta da rede viária. Quanto maior a quantidade de *links* alternativos que viabilizem rotas entre pares OD mais flexível será a rede.

2.3 Considerações do capítulo

No presente capítulo foram abordados os pressupostos teóricos metodológicos acerca de rede de transportes, bem como os seus respectivos atributos de desempenho. Tal contexto introdutório será importante nas futuras etapas desta dissertação, onde tratar-se-á de implantação de modelos em redes de transportes, especificamente na medição dos atributos de desempenho.

A discussão se iniciou com a definição da rede e da sua iteração com os atributos da demanda e da oferta, finalizando com as características próprias de cada sistema. Observa-se que a característica do sistema (disposição dos arcos, capacidade e fluxos) interfere diretamente na percepção do usuário quanto ao nível de serviço. Esse raciocínio deverá ser considerado no trabalho de modelagem, precisamente na fase de delimitação da rede e construção dos atributos físicos (capacidade) e de demanda (fluxos).

Conforme contextualização dos fundamentos de uma rede de transportes e dos atributos a ser ponderados em uma análise de desempenho, pretende-se aprofundar na literatura acerca de alocação dos fluxos de veículos, utilizando a estrutura da rede (Capítulo 3).

3 MODELAGEM DA REDE DE TRANSPORTES: MÉTODOS DE ALOCAÇÃO E ESCOLHA DE ROTAS

A abordagem utilizada neste capítulo busca discutir o conceito de alocação dos fluxos em uma rede de transportes, bem como os métodos considerados no processo de simulação. Na literatura, compreende-se que o problema de alocação de fluxos em redes de transporte compõe, primordialmente, de um problema de escolha de rotas e um problema de distribuição de fluxos nas rotas escolhidas a partir de uma matriz origem-destino (CAMPOS, 1997).

No contexto de escolha de caminhos, para Thedim *et al.* (2014) o objetivo de encontrar um conjunto de rotas, onde se inicia termina no mesmo ponto, cumprindo a demanda e minimizando o custo total é denominado problema de roteirização de veículos.

A aproximação mais comum é considerar apenas dois fatores na escolha de rota: tempo e custo monetário; Além disso, o custo monetário é muitas vezes considerado proporcional à distância percorrida (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011). Logo, parte-se do pressuposto que o usuário busca minimizar o tempo da sua viagem.

Entretanto, para efeito desta pesquisa, busca-se questionar se os atributos de confiabilidade, risco e vulnerabilidade podem gerar efeito no processo de escolha de rotas pelos transportadores, não apenas o tempo mínimo. A escolha do transportador se deve à característica de sua operação, pois diferentemente do usuário comum, a rota do operador logístico (transportador), em muitos casos, leva em conta a confiabilidade da entrega do produto dentro do tempo delimitado, avaliando o risco de haver falhas nos arcos que compõem o percurso.

O objetivo deste capítulo é identificar, dentro dos métodos de alocação existentes, quais se adéquam ao fenômeno do transporte urbano de carga. Analisar-se-á suas restrições e composições. Desta forma, a discussão será precedida por alguns conceitos introdutórios acerca de grafos e redes, no intuito de melhor compreensão dos preceitos da modelagem.

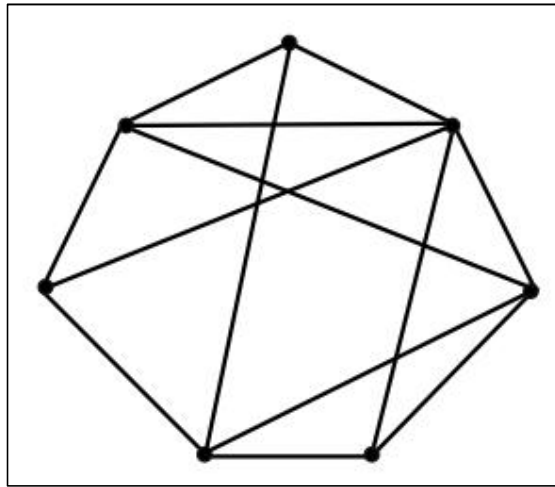
3.1 Conceituação de Grafos

Uma rede de transporte física pode ser modelada por estruturas diagramáticas denominadas de grafos. Tal conceito pode ser representado por figuras geométricas, formadas por vértices (nós) e arestas (arcos) que conectam alguns destes pontos (CAMPOS, 1997).

Assim, um dado grafo $G = (X, A)$ se trata de uma estrutura composta por um conjunto $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ de elementos chamados vértices ou nós e um conjunto $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 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 (IDEM, 1997).

Figura 5 – Grafo não direcionado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Campos (1997) os grafos variam conforme:

- orientação: são orientados quando ilustram o sentido, representado por setas. Possuem uma origem e um destino definidos.
- escala/valor: quando são valorados, recebem indicações de positivos ou negativos. Cada peso representa a impedância atribuída àquele arco.
- planaridade: Um grafo planar pode ser projetado sobre um plano sem perder suas características, haja vista que os arcos somente se tocam em um nó. Caso o grafo não seja planar, ao projetá-lo em um plano haverá arcos que se cruzam sem pertencer ao mesmo nó.

Na figura 5, tem-se um exemplo de grafo não direcionado com 7 vértices e 13 arestas. A seguir, explicam-se os elementos constituintes dos grafos.

3.1.1 Elementos constituintes

De forma resumida, são elementos que compõem um grafo de rede, viária ou não:

- a) laço: trata-se de um arco que tem origem a partir de um nó e termina nele mesmo;
- b) arco ou nó incidente: um arco ou nó é incidente a outro nó quando este é destino ou origem do arco;
- c) grau de um nó: é medido pelo número de arcos incidentes num determinado nó. Tal conceito abrange duas características, a primeira é o semigrau interior, número de arcos incidentes interiormente ao nó e a segunda é o semigrau exterior que corresponde ao número de arcos incidentes exteriormente ao nó;
- d) vértices adjacentes: dois vértices, ou nós, são considerados adjacentes um ao outro quando existe um arco conectando-os;
- e) 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 tamanho de uma cadeia corresponde ao número de arcos que a compõem.
- f) caminho: é uma cadeia na qual todos os arcos possuem o mesmo sentido. O conceito de caminho é, portanto, orientado.
- g) caminho simples ou elementar: são considerados simples quando não repetem ligações (arcos). São elementares quando não repetem vértices.
- h) ciclo: é uma cadeia simples na qual o nó inicial e o nó final se confundem (cadeia fechada).
- i) circuito: é um caminho simples e fechado em um grafo orientado.

A compreensão básica do conceito de grafos é pertinente para a compreensão dos algoritmos de caminho mínimos utilizados no transporte de mercadorias. Estes algoritmos serão utilizados para a comparação com o método proposto.

Entende-se que a escolha de rota do motorista, inicialmente, adota o caminho mínimo entre dois pontos. Posteriormente, as condições do carregamento ou da própria via, refletem mudanças na decisão. Esse conceito será discutido nas seções seguintes.

3.2 Algoritmos de escolha de rotas baseados em custo mínimo

Inicialmente, os algoritmos de escolha de rota, como os de Dijkstra (1959) e Ford (1956), forneciam caminhos mínimos (baseados na distância) a partir de um vértice para todos os outros. A premissa básica partia de um passo inicial (atribuição do valor inicial da distância do primeiro nó para os demais) e de passos seguintes cujas iterações buscam reduzir gradualmente à distância até chegar ao ponto de parada. A maior diferença entre ambos os algoritmos é que o de Dijkstra não considera valores de arcos negativos, ou seja, não há como utilizar um caminho contrário ao sentido do destino, ao passo em que o de Ford há a possibilidade de utilizar arcos com valores negativos. Os demais algoritmos presentes na época seguiam propostas que se alicerçavam nos trabalhos desses dois pesquisadores.

As primeiras formulações atendiam bem ao problema de caminho mínimo, considerando a distância. Entretanto, não consideravam o custo do arco envolvido. A premissa básica no processo de modelagem do comportamento do usuário é a presunção da racionalidade do viajante, ou seja, um indivíduo escolhe o caminho que oferece o menor custo percebido (antecipadamente). Uma série de fatores é considerada na influência da escolha da rota durante a condução entre dois pontos. Entre os fatores incluem: o tempo de viagem, a distância, o custo monetário (combustível etc.), o congestionamento, tipo de manobras necessárias, tipo de estrada, o cenário, sinalização, obras rodoviárias entre outros.

A produção de uma expressão de custo generalizado que incorpore todos estes elementos é uma tarefa difícil. Assim, não é prático tentar modelar todas estas impedâncias em um modelo de alocação de tráfego, portanto, as simplificações são inevitáveis.

Logo, “os algoritmos de custo mínimo tratam do problema de enviar uma quantidade qualquer de fluxo V de S para T , numa rede de n nós, na qual todos os arcos (i,j) têm uma capacidade ou limite superior $u(i,j)$ tanto e um custo $c(i,j)$ associado a eles.” (CAMPOS, 1997, p, 51).

O objetivo dos algoritmos de custo mínimo é definir as rotas que minimizam o custo total do usuário, ou seja, lançar mão da Equação 1.

$$\min y = \min \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c(i,j) f(i,j) \right] \quad (1)$$

Sendo

$c(i,j)$: custo no arco (i,j) ;

$f(i,j)$: fluxo alocado no arco (i,j) ;

Quando o modelador opta por utilizar um algoritmo de caminho mínimo, não leva em consideração a aleatoriedade do processo da escolha de rota pelo motorista. Em outras palavras, inicialmente as rotas escolhidas são as que possuem o menor custo perceptível ao usuário para um determinado par OD. Encontra-se, assim, uma solução ótima de distribuição de fluxos que leve a um custo total mínimo, mas que não necessariamente possa ser percebido pelo usuário na rede.

3.3 Métodos para distribuição dos fluxos

Os métodos desenvolvidos para distribuir, ou alocar, o fluxo em redes de transporte surgiram em meados da década de 50. Em especial com a pesquisa do modelo de equilíbrio de Wardrop (1952) e, na década de 1960, do Tudo-ou-nada (Item 3.3.1.1). A eclosão de pesquisas nesse campo decorreu do crescimento urbano acelerado, conseqüentemente do aumento da disputa por espaço nas vias. Para modelar este fenômeno, as técnicas de alocação do tráfego devem seguir alguns preceitos. A seguir, são apresentadas algumas propriedades desejáveis do ponto de vista do modelador:

- a) realismo: os tempos de viagem modelados devem ser realistas o suficiente;
- b) a função deve ser não-decrescente: aumentar o fluxo não deverá reduzir o tempo de viagem;
- c) a função não deve gerar um tempo de viagem infinito: mesmo quando o fluxo é igual ou maior do que a capacidade. Isso pode acontecer, como parte de um processo iterativo quando mais tráfego é atribuído a um arco, além da sua capacidade;
- d) duração do período de observação: a localização exata das zonas de medição do fluxo, desempenha um papel crítico na determinação da qualidade dos resultados obtidos;
- e) a suposição de que os congestionamentos dependem apenas do fluxo no arco, em si, não é realista em redes urbanas mais densas.

Os métodos a ser apresentados neste capítulo se baseiam principalmente na escolha de rotas mínimas para distribuição do tráfego, pois se entende que esta é a premissa básica do motorista ao escolher um percurso. Contudo, mediante a crescente demanda de tráfego nos centros urbanos adensados, evidenciou-se a necessidade de desenvolver modificações nos métodos existentes. Desta forma, surgiram métodos que consideram o decréscimo da velocidade em função do carregamento da via, influenciando na escolha da rota.

Em seu trabalho, Ortuzar e Willumsen (2011) delimitam alguns métodos de alocação, considerando a classificação da rede (carregamento e variáveis), conforme evidenciado Tabela 1, abaixo:

Tabela 1 – Esquema de classificação para alocação de tráfego

<i>Modelo de rede</i>	<i>Variáveis estocásticas inclusas?</i>	
	Não	Sim
Sem restrição de capacidade (rede não congestionada)	Tudo-ou-nada	Burrell
Com restrição de capacidade (rede congestionada)	Equilíbrio de Wardrop / Incremental / Médias Sucessivas	Equilíbrio estocástico do usuário

Fonte: (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011).

Observa-se que os métodos de distribuição dos fluxos na rede são classificados conforme a característica do modelo. Quando não há restrição de capacidade, no caso de uma rede não congestionada, os métodos do Tudo-ou-nada (*all-or-nothing*) e de Burrell podem ser utilizados. Ao considerar o carregamento da via, o método de Wardrop (1952), bem como os métodos resultantes, mostra-se realista sob o ponto de vista do acondicionamento da demanda nos arcos.

Pode-se também classificar os métodos em determinísticos e estocásticos no processo de simulação de cenários. Salienta-se que ambos possuem vantagens e desvantagens, desta forma, são utilizados conforme o fenômeno a ser estudado, bem como na disponibilidade de recursos da pesquisa. Existem outros métodos de alocação dos fluxos, contudo para a discussão desta pesquisa e o fenômeno do transporte urbano de carga serão abordados os descritos anteriormente.

3.3.1 Rede não congestionada

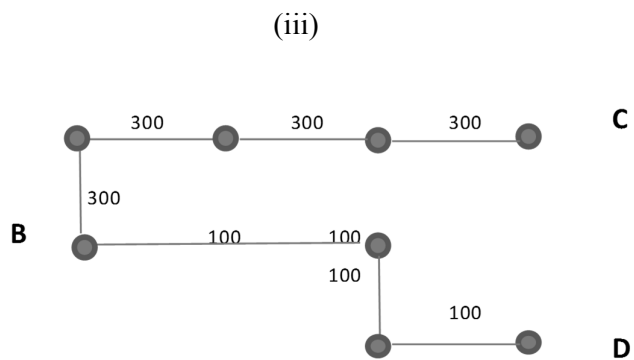
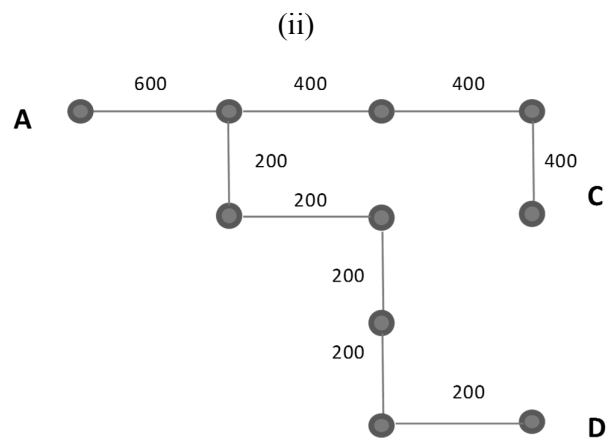
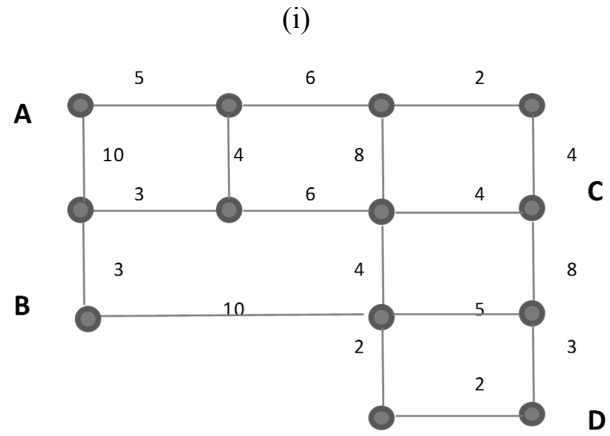
O método mais simples de escolha de rota e alocação é o “tudo-ou-nada”. Desenvolvido na década de 60, este método assume que não há efeitos de congestionamento, ou seja, todos os motoristas consideram os mesmos atributos para a escolha de rotas e que eles os percebem e pesam da mesma forma.

3.3.1.1 Tudo-ou-nada (all-or-nothing)

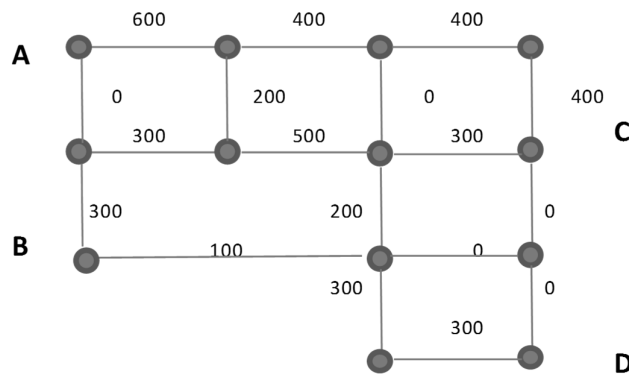
A ausência de efeitos do congestionamento na rede viária significa que os custos dos arcos são fixos. O pressuposto de que todos os motoristas percebem os mesmos custos significa que cada motorista cuja origem parte do nó i para o nó j devem escolher a mesma rota. Por conseguinte, todos os usuários são alocados à mesma rota mínima entre i e j e nenhum usuário é atribuído a outras rotas menos atraentes (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011).

Na prática, os algoritmos de tudo-ou-nada geralmente processam toda a árvore de rotas mínimas a partir de uma origem ou a um destino e nada para rotas alternativas (CASCETTA, 2009). Assim, Ortuza e Willumsen (2011) demonstram a dinâmica da alocação tudo-ou-nada na Figura 6.

Figura 6 – (i) custos da rede, não congestionada, na alocação tudo-ou-nada; (ii) alocação A-C/A-D; (iii) alocação B-C/B-D; (iv) resultado



(iv)



Fonte: (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011).

Este é provavelmente o mais simples, mas não necessariamente o método mais eficiente. Neste caso, começa-se a partir de uma origem e aloca o fluxo a cada destino. Considera-se todo o volume $V_{OD} = 0$ (volume nos arcos existentes entre a origem O para o destino D), Em seguida, para cada par OD:

- a) considera o menor custo da origem i para o destino j ;
- b) se (A, B) é o conjunto de arcos de custo mínimo entre os nós i, j , então se incrementa $V_{A,B}$ nesse conjunto de arcos existente;
- c) processar o seguinte par (i, j) , até que todos os fluxos OD estejam alocados.

Essas suposições são razoáveis em redes esparsas e não congestionadas onde há poucas rotas alternativas e estas são muito diferentes em termos de custos perceptíveis pelo usuário. Isto posto, entende-se que o método tudo-ou-nada não representa satisfatoriamente o comportamento do condutor do transporte de carga nas vias urbanas adensadas pelo fato de: (i) haver presença de congestionamentos e (ii) alta capilaridade de vias.

3.3.1.2 Método de Burrell (1968)

Os métodos estocásticos de alocação de tráfego, como o de Burrell (1968), enfatizam a variabilidade na percepção dos custos e medidas que procuram minimizar a distância, tempo de viagem e custos generalizados dos motoristas. Nesse tocante, os métodos estocásticos consideram as “segundas melhores rotas” entre nós, entretanto esta diretriz gera problemas adicionais como o elevado número de segundas alternativas entre cada par de O-D, aumentando o tempo de processamento.

Em suma o método de Burrell (1968) utiliza a técnica de simulação de Monte Carlo (a ser discutido no Item 3.5) para estimar a percepção dos custos dos motoristas, ou seja,

assume-se que a percepção dos custos dos arcos segue uma distribuição de frequências e que o somatório dos custos de cada arco gera a rota mínima. Enquanto Burrell assume uma distribuição uniforme, outros modeladores sugerem uma distribuição da percepção dos custos normal (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011). Conforme Gráfico 1.

Gráfico 1 – Distribuição Normal da variável de percepção dos custos dos motoristas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse caso, a percepção dos custos segue uma distribuição de frequência Normal onde 68% dos motoristas percebem os custos que estão a até um desvio padrão da média. Para a execução do método se assume que:

- a) as distribuições dos custos percebidos pelos motoristas são independentes;
- b) os condutores escolhem as rotas que minimizam o custo total percebido, ou seja, a soma dos custos individuais.

A descrição geral destes algoritmos segue os seguintes passos: (i) selecionar uma distribuição e espalhar o parâmetro σ para os custos percebidos em cada ligação; (ii) dividir a população viajando ao longo de cada par O-D em N segmentos, cada um assumindo perceber os mesmos custos.

Assim:

- a) faça $n = 0$;
- b) faça $n = n + 1$;
- c) para cada par ij :
 - calcule custos percebidos para cada *link* por amostragem a partir das distribuições correspondentes de custos por meio de números aleatórios;

- construa o caminho de custo mínimo percebido de i para j e aloque T_{ij} / N viagens.
- d) se $n = N$ pare, caso contrário, vá para o passo b.

Estes métodos geralmente produzem um leque razoável de viagens e são relativamente simples de programar. Por incluir a variável estocástica da percepção do custo da rota no processo de alocação do fluxo, este método mostra aderência ao fenômeno, mas por não considerar o carregamento da rede, ou congestionamento, torna-se não representativo para o transporte de carga.

3.3.2 Rede congestionada

Nestes métodos a capacidade das vias é considerada e, destarte, gera restrições na circulação dos veículos a depender da quantidade de veículos alocada. São métodos mais complexos, contudo refletem melhor a dinâmica da escolha das rotas no contexto do transporte urbano.

3.3.2.1 Equilíbrio de Wardrop

Wardrop (1952), em sua pesquisa, definiu critérios específicos para a alocação dos fluxos na rede de forma que esta fique em equilíbrio. Estes critérios, concomitantemente servem para a identificação dos caminhos mínimos dos usuários.

Os dois princípios extremos são:

- a) equilíbrio: uma rede está em equilíbrio quando o usuário não consegue alterar o seu custo mínimo (tempo) ao alterar a sua rota individualmente (haja vista que ele já está utilizando o seu caminho mínimo);
- b) equilíbrio do sistema: o tempo médio global de viagem do sistema é mínimo, ou seja, nenhum condutor conseguirá alterar sua rota sem que resulte em um aumento global do tempo de todos os outros usuários.

Os métodos posteriores de alocação buscam seguir tais preceitos, pois se acredita que os métodos de alocação baseados no equilíbrio de Wardrop reproduzam mais fidedignamente as características do tráfego urbano, como a restrição de capacidade dos arcos.

3.3.2.2 Alocação incremental

No método da Alocação Incremental o modelador divide o total (T) da Matriz OD em frações da matriz, aplicando a proporção P_n , tal que $\sum_n P_n = 1$. Tal método permite o recálculo da rota de custo mínimo para cada par OD mediante iteração até que a totalidade do volume seja alocada.

Os algoritmos iterativos buscam amenizar o problema de alocar muito volume em arcos de baixa capacidade, mas como será visto posteriormente a depender da calibração nem sempre atingem ao objetivo.

Conforme Ortuzar e Willumsen (2011) os valores típicos de P_n são: 0,4, 0,3, 0,2 e 0,1. Nessa conjectura, as matrizes fracionadas são sucessivamente carregadas na rede viária, onde cada carregamento considera os custos dos arcos do anterior. O algoritmo é descrito conforme as etapas:

- a) selecionar um conjunto de arcos iniciais, com seus respectivos custos em fluxo livre. Inicialize todos os fluxos com volume $V_a = 0$;
- b) selecionar o conjunto P_n de frações da matriz total, de tal forma que o somatório das proporções dê 1. Inicie com $n = 0$.
- c) calcular o custo de cada arco em condições de fluxo livre;
- d) identificar o caminho mínimo para cada ponto ij e através do método tudo-ou-nada, aloque o volume neste caminho mínimo. Faça $n = n + 1$;
- e) se ainda houver alguma fração da Matriz T ainda não alocada, voltar ao passo b.

O método de alocação Incremental não converge necessariamente no equilíbrio de Wardrop, mesmo que o número de frações seja elevado. Uma argumentação é que uma vez alocada a fração P_n do fluxo em um arco, não há como realocá-la nas próximas iterações. Caso o volume alocado neste arco, iteração $n = 1$, mostre, posteriormente, ser muito elevado (é comum alocar a primeira iteração nos arcos centrais) a alocação Incremental revelará não ser aderente ao comportamento esperado.

Apesar disso, entende-se que quanto menor for a fração alocada a cada iteração, mais tenderá ao equilíbrio do usuário. Nesse contexto, a alocação incremental apresenta duas vantagens: é simples de programar e os seus resultados podem ser interpretados como o acúmulo progressivo de congestionamento em horários de picos.

3.3.2.3 Método das Médias sucessivas

Nesse algoritmo, a iteração para atribuição do fluxo em um arco é calculada como uma combinação linear do fluxo corrente da iteração anterior e de um fluxo auxiliar, resultante de uma atribuição de tudo-ou-nada na iteração atual.

Da mesma forma que o método de alocação Incremental, o método das Médias Sucessivas utiliza em cada iteração uma alocação tudo-ou-nada entre cada par OD. No entanto, este método ameniza eventuais erros de alocação ao longo das iterações. A constituição do algoritmo segue as definições:

- a) selecionar um conjunto de arcos iniciais, com seus respectivos custos em fluxo livre. Inicialize todos os fluxos com volume $V_a = 0$;
- b) calcular o custo de cada arco em condições de fluxo livre. Faça $n = n + 1$;
- c) inserir a totalidade da Matriz T pelo método tudo-ou-nada para a obtenção de um conjunto de fluxos auxiliares denominados F_a .
- d) Calcular os fluxos atuais como:

$$V_a = (1 - \emptyset)V_a^{n-1} + \emptyset F_a$$

$$\text{Onde } 0 \leq \emptyset \leq 1$$

- e) Logo, deve-se calcular uma nova iteração para encontrar os custos dos arcos atuais com base nos fluxos de V_a^n . Se os fluxos, ou custos dos arcos atuais, não mudarem significativamente em duas iterações consecutivas, pare; caso contrário, vá para a etapa b.

O fator \emptyset pode ser considerado como uma constante, ou pode vir em função de n (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011). A correta calibração do fator influirá na fidedignidade da alocação.

3.3.2.4 Equilíbrio estocástico do usuário

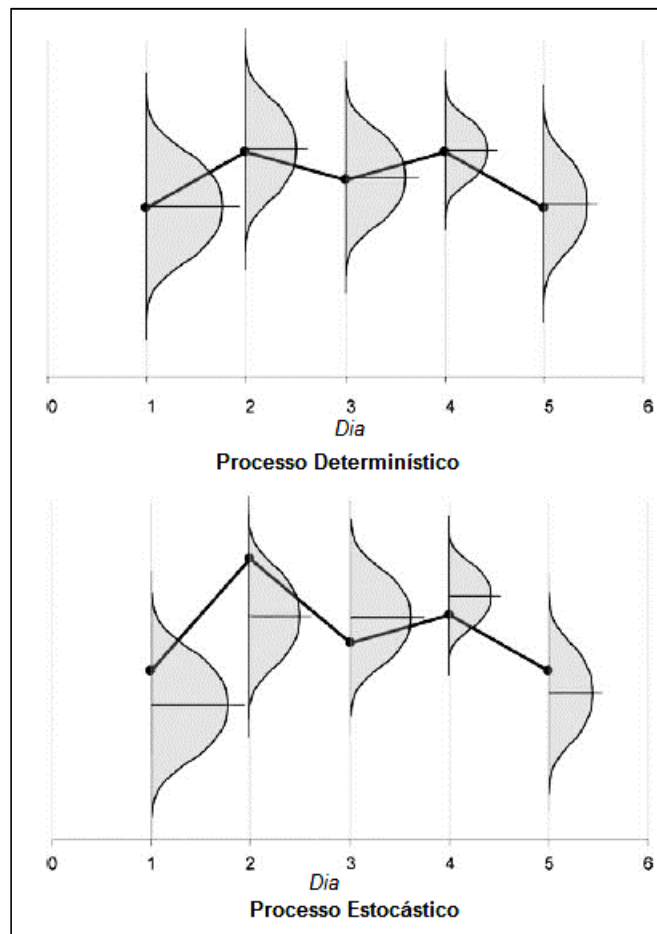
Os modelos de equilíbrio estocástico do usuário (sigla em inglês: SUE) são aqueles que buscam simular as variabilidades nas percepções de custos das rotas pelos usuários aliadas aos efeitos das restrições de capacidades das vias. Foram introduzidos por Daganzo e Sheffi (1977) e otimizados exaustivamente nos anos sucessivos. Por exemplo, os modelos de otimização propostos por Fisk (1980).

A maior diferença entre o equilíbrio estocástico com o de Wardrop é que no primeiro, cada motorista define o custo da rota individualmente, utilizando variáveis aleatórias no processo, em vez de usar uma única medida de custos aplicáveis a todos os motoristas.

3.4 Modelos de processamento determinísticos

Para Cascetta (2009) os modelos de simulações determinísticos derivam do pressuposto de que os fluxos de rota previstos no dia t são representados por variáveis determinísticas, ou seja, que os fluxos reais coincidem com os seus valores médios (conforme Figura 7).

Figura 7 – Gráficos que representam os processos de simulações determinísticas e estocásticas



Fonte: (CASCETTA, 2009, p. 404).

Simulações determinísticas são referidas como sendo simulações “*e se?*”. Ou seja, nessas simulações, um único valor (ex. tempo médio, combustível) é escolhido para cada variável aleatória de entrada (um particular cenário “*e se?*”) com base em um palpite pelo modelador (SOKOLOWSKI; BANKS, 2010). A simulação é, então, executada e o dado de saída é observado. Esta saída é um valor único ou um único conjunto de valores com base na entrada escolhida, mas devido as variáveis de entrada ser aleatórias, elas podem ser qualquer número de valores definidos por suas distribuições de probabilidade. Logo, para ter uma noção de como o sistema irá se comportar diante de todos os cenários, mais do que um conjunto de entradas devem ser avaliados.

3.5 Modelos de processamento estocásticos

Simulação de Monte Carlo é muitas vezes superior a uma simulação determinística de um sistema quando esse sistema tem variáveis de entrada que são aleatórios. A simulação de Monte Carlo aleatoriamente amostras de valores de cada distribuição variável de entrada e usa esse exemplo para calcular a saída do modelo. Este processo é repetido várias vezes até que o modelador obtém uma noção de como a saída varia dados os valores de entrada aleatórios.

Deve-se ver facilmente que, quando a simulação contém variáveis aleatórias de entrada, a simulação de Monte Carlo produzirá um resultado que é provável que seja mais representativa do comportamento real do sistema.

Cascetta (2009) salienta que os termos estocástico e determinístico têm significados diferentes quando se referem às formulações do processo dinâmico, contra modelos de escolha de rotas. No primeiro caso, eles se relacionam com a representação real do sistema, isto é, com suposições feitas pelo analista sobre a natureza determinista ou probabilística das variáveis de estado. No segundo, eles se relacionam com suposições feitas na modelagem de escolha das rotas, ou seja, a ausência ou a presença de um dado aleatório nas funções de utilidade e que geram influência na decisão do usuário.

3.6 Considerações do capítulo

O presente capítulo objetivou identificar, dentre os diversos métodos de alocação de fluxos existentes, qual se adequa ao escopo do transporte urbano de carga. Para isso,

realizou-se um diálogo teórico entre os principais autores, apresentando os métodos mais utilizados para os diversos propósitos de modelagem de rede de transportes.

Observa-se que cada método existente na literatura descrito neste capítulo atinge o objetivo de alocar os fluxos de tráfego na rede viária de maneira satisfatória. As diferenças existentes entre eles são evidenciadas nas características irrefutáveis do ambiente a ser modelado. Por exemplo, no transporte regional de mercadorias as características da maioria dos fluxos OD são de: vias alternativas escassas, percepção de custo homogênea entre os usuários e pouca presença de congestionamento. Nesse caso, a alocação tudo-ou-nada poderá ser a mais indicada.

O escopo desta pesquisa é no transporte urbano de carga em áreas adensadas, nesse contexto o método de alocação deverá contemplar duas características que não poderão ser negligenciadas: a restrição de capacidade dos arcos da rede e a densa capilaridade do sistema. Nesse tocante, os métodos que inserem o congestionamento em suas restrições são indicados.

Grande parte das pesquisas com vulnerabilidade e confiabilidade lança mão do modelo de equilíbrio de Wardrop como método de alocação e determinação da menor rota. Autores como Huang *et al.* (2012), Tampère *et al.* (2007), Sullivan *et al.* (2010), Scott *et al.* (2006) e Jenelius *et al.* (2005) adotaram o modelo de equilíbrio do usuário em suas pesquisas, ou seja, parte do princípio que os usuários escolhem a rota de origem e destino que minimize o tempo de viagem.

Scott *et al.* (2006) argumentam que o modelo de equilíbrio do usuário possui duas características que o torna hábil para ser aplicado na modelagem de transporte. Em primeiro lugar, esse modelo representa o congestionamento da rede, ou seja, nenhum usuário pode melhorar o seu tempo de viagem, alterando unilateralmente as rotas. Tal atribuição é mais realística, haja vista que caso assumisse que os usuários empregassem apenas os caminhos de tempos mais curtos pela rede, concentrar-se-ia o tráfego em um pequeno número de arcos que formam as rotas mais rápidas entre pares OD. Em outras palavras, a maioria dos arcos não receberia fluxo.

Um segundo argumento apontado pelos autores diz respeito à sua capacidade de representar o comportamento de usuários da rede que não usam um determinado arco interrompido e que poderão ser realocados, como consequência do redirecionamento de usuários que fazem uso do arco interrompido. Ou seja, ambos os usuários e não usuários de uma rota interrompida podem ser afetados por sua remoção. Consequentemente, no modelo de

equilíbrio do usuário, as realocações de usuários dispersos pela rede viária deverá impactar o tempo de viagem dos arcos no sistema.

A escolha pelo modelo de equilíbrio determinístico em relação ao estocástico é feita, sobretudo, pelo elevado grau de cálculos computacionais exigido, demandando tempo com simulações inviáveis para o objetivo da análise.

Pelos motivos expostos, adotar-se-á o modelo determinístico de equilíbrio do usuário para simular o contexto urbano adotado nessa pesquisa.

4 CONFIABILIDADE, VULNERABILIDADE E RISCO NA MODELAGEM APLICADO AO TRANSPORTE DE CARGAS

Até o momento, os capítulos apresentados abordaram os aspectos teóricos acerca de rede de transporte e modelagem, com foco em algoritmos de escolha de rota e na alocação da demanda. Neste capítulo, pretende-se aprofundar a discussão sobre os três atributos de desempenho (confiabilidade, vulnerabilidade e risco) que serão analisados no método proposto como parte do objetivo geral da pesquisa. Busca-se também analisar de forma sistêmica como são tratados na comunidade científica sob a forma de modelos matemáticos e como estes atributos de desempenho podem ser inseridos em modelos de escolha de rotas, em especial no transporte de cargas.

Em suma, o atributo da confiabilidade se refere à variabilidade do tempo de viagem (podendo ser medida a nível de arcos, rotas ou da rede), ou seja, um arco é confiável caso o tempo experimentado pelo usuário não varie acentuadamente em torno da média. O risco se remete à probabilidade de ocorrer um evento intempestivo que interrompa o fluxo de um arco, gerando aumento de tempo de viagem e alterações de rotas. Por fim, a vulnerabilidade é o atributo de desempenho que trata do pós-incidente, isto é, ao passo que ocorreu a falha no arco da rede se mede o impacto em termos de aumento de tempo, ou custo, de viagem.

Notadamente, os três atributos estão intimamente relacionados. Defende-se nesta pesquisa que para haver uma análise precisa dos fundamentos de um atributo (ex. confiabilidade) é necessário estimar os outros dois atributos (como o risco e a vulnerabilidade dos arcos).

Como forma de iniciar o capítulo, abordar-se-á a maneira de como os custos e o frete são tratados na logística, especificamente no transporte de carga.

4.1 Cálculo de custos no transporte de cargas

As impedâncias, quando vistas sob a ótica do transportador, devem constituir de todos os sacrifícios, monetários ou não, que envolvem o processo de carregamento, expedição e descarga das mercadorias.

Nesse contexto, entende-se que o processo de formação do frete (remuneração do transportador) se diferencia da apuração dos custos. No primeiro caso, incluem-se fatores

remunerativos do capital, ou seja, o lucro esperado na operação, ao passo em que no segundo caso se consideram, essencialmente, os custos despendidos na operação. Desta forma, é apropriado afirmar que há maior representatividade do fenômeno para a escolha de rota quando se lança mão do custo ao invés do valor do frete para cada par origem-destino. A Figura 8, evidencia os elementos de custos e remunerações tratados neste capítulo.

Figura 8 – Preço de frete *versus* custos operacionais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os próximos itens buscam esmiuçar as duas vertentes (frete e custos), de forma que se tenha maior subsídio para a composição do modelo de escolha de rota adotado nesta pesquisa.

4.1.1 Formação do preço de frete

Para a formação de preços de fretes no transporte de cargas nacional, ou seja, a remuneração do transportador, deve-se aglutinar os custos (diretos e indiretos) inerentes ao processo de movimentação das mercadorias. Diante disso, a NTC&LOGÍSTICA, através do DECOPE – Departamento de Custos Operacionais e Pesquisas Técnicas e Econômicas – desenvolveu um conjunto de especificações e bases de cálculo dos custos do transporte de

cargas, chamado “Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas”. (DECOPE, 2014).

Pretende-se, assim, descrever neste tópico os custos e despesas de modo abrangente, de forma a indicar quais serão utilizados no modelo de escolha de rota. Nesse tocante, a tarifa do transporte de cargas, basicamente, é composta por quatro componentes. São estes:

- a) Frete-peso;
- b) Frete-valor;
- c) GRIS;
- d) Generalidades.

O frete-peso é um componente da tarifa de frete em que busca remunerar o transporte da mercadoria entre os pontos OD. Desse modo, de maneira geral inclui os custos diretos e indiretos, além do percentual de lucro operacional (remuneração do transportador). A concepção básica do frete-peso é descrita na Equação 2 (DECOPE, 2014).

$$F = (A + BX + DI). \left(1 + \frac{L}{100}\right) \quad (2)$$

Sendo

F = frete-peso (R\$/tonelada);

X = distância da viagem (percurso), em km;

A = custo do tempo de espera durante a carga e descarga;

B = custo de transferência (R\$/t.km);

DI = despesas indiretas (R\$/tonelada);

L = lucro operacional (%).

As despesas indiretas não variam conforme a quilometragem rodada, mas com o volume de carga movimentado. São relacionadas à alugueis de galpões, salários da diretoria, depreciações, impostos e taxas. Seu valor pode ser apurado ao dividir o seu valor mensal pelo volume total mensal movimentado.

O frete-valor, ou *ad valorem*, trata-se do componente tarifário que é mensurado a partir de um percentual aplicado sobre o valor da nota fiscal da mercadoria transportada. Nesse contexto, é crescente à medida que a distância aumenta e é proporcional ao tempo que a mercadoria fica sob a responsabilidade do transportador. Em geral, constitui-se de:

- a) prêmios de RCTRC;
- b) administração de seguros;
- c) indenização por extravios, perdas, danos e riscos não cobertos pelo seguro;
- d) segurança interna;
- e) seguros de instalações;
- f) outros seguros.

O GRIS, ou Gerenciamento de Riscos, é independentemente da distância a ser percorrida e tem como fim cobrir os custos específicos oriundos das medidas de combate ao roubo de cargas. Desta forma, refere-se as operações de prevenção e das despesas de mão de obra aplicada a essas atividades. Tais como:

- a) seguros facultativos de desvios de cargas (RCF-DC);
- b) salários:
 - monitores de equipamentos de rastreamento e segurança;
 - horas extras;
 - obrigações sociais.
- c) investimentos:
 - investimentos em sistema de rastreamento e monitoramento;
 - taxas de habilitação dos equipamentos;
 - retorno do investimento;
 - reposição dos equipamentos.
- d) custos operacionais de gerenciamento de riscos:
 - taxas do FISTEL;
 - bilhetagem;
 - consultas a cadastros de carreteiros;
 - escoltas.

Por fim, as Taxas de Generalidades se referem aos serviços adicionais pertinentes ao transporte da mercadoria específica para cada cliente. Ou seja, são cobradas somente se o serviço for necessário. Tais taxas incluem: pedágios, travessias, taxa de reentrega, retorno da mercadoria, estadias, locação de armazéns temporários para a carga, taxa de agendamento prévio para descarga entre outros.

A soma destes quatro componentes constitui o total do frete, que é específico para cada transportadora e para cada tipo de serviço realizado.

No âmbito da modelagem de escolha de rotas, entretanto, não é interessante tratar o valor do frete como critério de impedância, haja vista que insere o lucro e a expectativa de

faturamento em sua composição. Para efeito de escolha de rota, os custos variáveis (tratados no tópico seguinte) refletem de forma mais concreta as impedâncias encontradas no trajeto, onde a escolha da rota interfere diretamente no resultado.

4.1.2 Formação dos custos operacionais

Os custos de coleta e entrega e de transferência correspondem às atividades do transporte de cargas propriamente ditas (DECOPE, 2014). Tais dispêndios, são categorizados em custos fixos e custos variáveis.

Os custos fixos correspondem aos sacrifícios monetários da operação de transporte que não variam com a distância percorrida, ou seja, continuam existindo, mesmo sem haver movimentação da carga. Estão ligados ao tempo e, geralmente, são calculados por mês. Os custos variáveis remetem àqueles que variam com a quilometragem rodada pela carga, ou seja, que só se manifestam durante a movimentação da carga e cessam quando o veículo está desligado.

Nos próximos tópicos, as definições serão exploradas de forma a explicar como são tratados sob forma de impedâncias em um modelo.

4.1.2.1 Custos fixos

O custo fixo total que envolve a operação de transporte é composto dos seguintes elementos:

- a) remuneração mensal do capital empatado (RC): refere-se ao custo de oportunidade em investir em outra área o montante que foi utilizado na aquisição do veículo. Normalmente é medido em uma taxa de retorno sobre o valor do investimento;
- b) salário do motorista (SM): correspondem aos encargos e os salários dos motoristas;
- c) salário de oficina (SO): inseridos em empresas que possuem oficinas próprias. Correspondem aos salários e encargos sociais dos funcionários da oficina;
- d) reposição do veículo (RV): representa o valor que deve ser destinado mensalmente para a reposição do veículo após a sua vida útil;

- e) reposição do equipamento/implemento (RE): possui o mesmo intuito do item anterior, entretanto para a carroceria do veículo;
- f) taxas e impostos sobre o veículo (TI): refere-se aos diversos impostos obrigatórios incidentes sobre o veículo (Licenciamento, IPVA, DPVAT, taxa de vistoria do tacógrafo etc.);
- g) seguro do veículo (SV): aporte mensal referente ao seguro obrigatório;
- h) seguro do equipamento/implemento (SE): idêntico ao tópico anterior, contudo refere-se à carroceria do veículo;
- i) seguro de responsabilidade civil facultativo (RCF): destinado a cobrir danos materiais e a complementar os danos pessoais causados a terceiros.

O custo fixo total, portanto, é o somatório de todas as parcelas de custo fixo oriundas da atividade de transporte de mercadorias. Sua síntese é demonstrada na Equação 3 abaixo:

$$CF = RC + SM + SO + RV + RE + TI + SV + SE + RCF \quad (3)$$

4.1.2.2 Custos variáveis

Conforme explicitado anteriormente, o custo variável é composto das parcelas que variam diretamente com a quilometragem percorrida pelo veículo. No contexto do transporte de cargas, os custos variáveis detêm as maiores parcelas de oportunidades de reduções no valor monetário. Tais parcelas, são categorizadas abaixo:

- a) peças, acessórios e material de manutenção (PM);
- b) despesas com combustível (DC);
- c) lubrificantes e óleos diversos (LB);
- d) lavagem e graxas (LG);
- e) pneus e recauchutagens (PR);

Os custos de combustível e pneus representam a maior parcela do custo variável para o transportador. A formulação geral para apuração dos custos variáveis é:

$$CV = PM + DC + LB + LG + PR \quad (4)$$

Notadamente, os custos variáveis representam melhor o comportamento do motorista quanto à escolha de rota, haja vista que uma rota mal planejada, ou com uma variação do tempo inesperada, acarretará diretamente em um custo variável maior.

O impacto da falha dos *links* em uma rede, pode ser medido como a alteração do tempo da rota, mas também pode ser medido em variações dos custos variáveis. Nos próximos tópicos, abordar-se-ão os conceitos de vulnerabilidade, confiabilidade e risco de forma a compreender como são moldados e como será feita a integração com os custos do transporte de carga.

4.2 Atributo da vulnerabilidade

Eventos de desastres naturais como a enchente no Acre (2014) e terremoto em Kobe (2005), cujas regiões sofreram interrupções no abastecimento de produtos essenciais, são de baixa probabilidade de ocorrência, contudo o custo generalizado decorrente para os envolvidos, direta e indiretamente, pode ser suficientemente elevado ao ponto de legitimar pesquisas acerca de atributos como vulnerabilidade de redes de transporte.

Para D'Este e Taylor (2001), o propósito de analisar a vulnerabilidade de redes de transporte se baseia na antecipação dos pontos de fraqueza onde essas redes são altamente vulneráveis, ou seja, falhas nesses nós e arcos resultarão em efeitos adversos substanciais nos seus desempenhos, em particular nas estratégias de escolha de rota e distribuição.

Devido à complexidade da probabilidade e incerteza nos eventos relacionados à vulnerabilidade, a avaliação da vulnerabilidade da rede de transportes pode ser extremamente difícil (CHEN *et al.*, 2006). Nesse tocante, a rede de transporte de cargas deve ser tomada como importante objeto de estudo no campo da modelagem no intuito de compreender seus componentes, em especial os custos associados à distribuição de mercadorias e como eles estão inseridos no fenômeno do transporte de carga.

4.2.1 Conceito de vulnerabilidade

Uma rede viária pode ser considerada vulnerável se a degradação de um pequeno número de arcos (ou possivelmente um arco) gera consequências substanciais na acessibilidade entre pontos específicos (D'ESTE; TAYLOR, 2001). A frequência de ocorrência dessa

degradação pode ser pequena, entretanto o impacto econômico e social é elevado. Para Jenelius (2005),

Vulnerabilidade aparece quando a rede (ou sistema de transporte) é colocado sob pressão, ou seja, quando a capacidade atinge o seu máximo e um pequeno estresse a mais pode causar um grande dano, ampliando-se em cascata através do sistema, possivelmente, até que ele entra em colapso. (2005, p. 539, tradução nossa).⁵

Para Berdica (2002) o conceito de vulnerabilidade é expresso como a suscetibilidade a incidentes que podem reduzir consideravelmente a capacidade da rede. O autor trata a suscetibilidade como uma fragilidade da rede, isto é, uma rede mais suscetível apresenta maiores impactos decorrente de falhas nos arcos.

Nessa conjectura, a vulnerabilidade da rede de transporte pode ser vista como um problema de acessibilidade reduzida, devido a diferentes perturbações nos arcos (CHEN *et al.*, 2006). Destarte, mensurar a vulnerabilidade seria equivalente a medir o impacto que a obstrução total, ou parcial, ocasionada por fatores naturais, ou não, de uma via reflete no desempenho da rede de transportes.

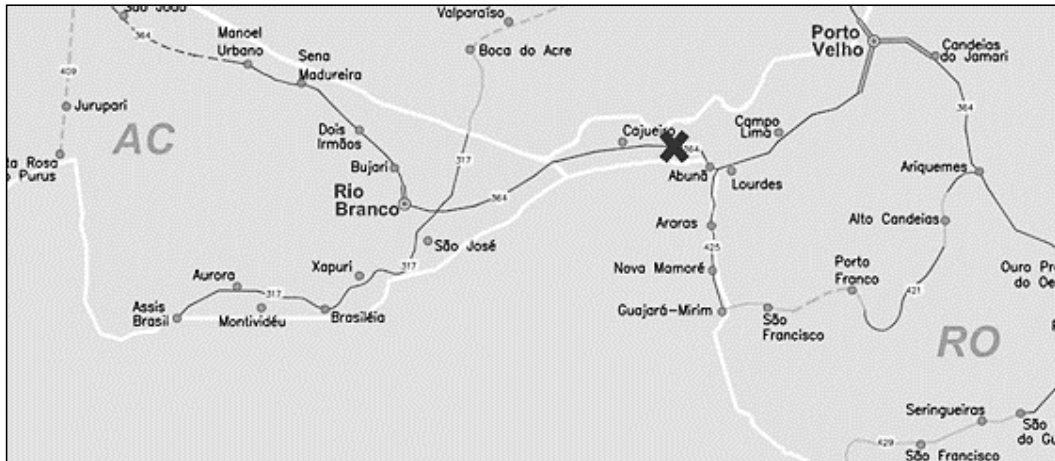
Vias urbanas adensadas sofrem grande interferência de obras e manutenções que bloqueiam, total ou parcialmente, arcos da rede e impõem aos transportadores custos adicionais devido à presença das intervenções. Nesse tocante, Chen *et al.* (2006) ressalta que a vulnerabilidade da rede pode ser analisada como a susceptibilidade a perturbações que podem causar uma redução significativa nos serviços de acessibilidade da rede, conseqüentemente, aumento nos custos relacionados ao desempenho.

4.2.2 Redes vulneráveis

Por meio da Figura 9, observa-se uma rede viária que conecta os estados brasileiros de Rondônia e Acre, este último possui a BR-364 como único *link* rodoviário a conectá-lo com o restante do país. Após uma enchente, em 2014, cuja probabilidade de ocorrência no ano seguinte é de 0,45%, (SAMUEL, B., 2014) houve interrupção no fluxo da rodovia em 24 km do trecho próximo à cidade de Abuña.

⁵ Traduzido do inglês: Vulnerabilities appear when the network (or transport system) is put under pressure, when the capacity reaches its maximum, and a small further stress could cause a major damage by magnifying itself and cascade through the system, possibly until it collapses.

Figura 9 – Vulnerabilidade de um sistema



Fonte: Ministério dos Transportes (2014).

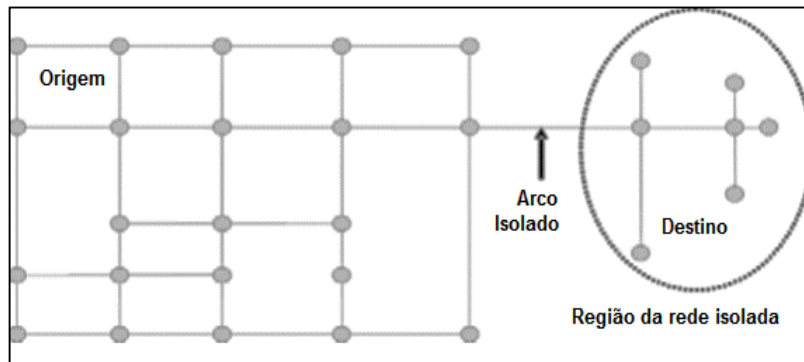
A falha no arco resultou para a região em desabastecimento de insumos e escoamento de seus produtos por aproximadamente 20 (vinte) dias. As opções de acesso seriam por meio fluvial ou aéreo. O custo total para os usuários afetados e a sociedade é de difícil mensuração devido à quantidade de variáveis inseridas no evento. Por conseguinte, apesar de ser um evento de baixa probabilidade de ocorrência os desdobramentos resultantes acarretam em um custo generalizado significativo. Tal afirmação é característica de redes de alta vulnerabilidade.

Conforme abordagem de Berdica (2002), condições climáticas extremas ou outros fenômenos naturais podem tornar diversos *links* da rede de transportes indisponíveis ou com redução de capacidade. Tais impactos podem motivar análises da resiliência desses *links*, ou seja, um atributo de vulnerabilidade. Os resultados desse atributo, por exemplo: o aumento do tempo total da viagem, cancelamento da viagem ou o valor total de combustível consumido por medida de distância possuem potencial para serem convertidos sob a ótica de custos, monetário ou não monetário. Os custos podem ser considerados como reflexos decorrentes, sob a forma de impedâncias, de atributos de desempenho da rede viária, como: congestionamento, vulnerabilidade, risco, confiabilidade, acessibilidade e flexibilidade, conforme destacados por Oliveira (2012).

A Figura 10 ilustra a discussão da vulnerabilidade no contexto urbano. Neste caso, nota-se que há concentração de arcos em algumas regiões e poucos arcos fazendo a conexão com áreas mais afastadas. Observa-se que tal configuração pode refletir a ligação entre áreas

industriais, ou de armazenagem, mais periféricas, com áreas de consumo, como as regiões centrais de grandes municípios. Este cenário é típico de redes vulneráveis que aumentam substancialmente os custos dos seus usuários ao apresentar falhas em arcos críticos. Com a expansão urbana, os arcos isolados, em geral trechos urbanos de rodovias, estão sendo cada vez mais utilizados para acesso às zonas residenciais externas, tornando-o mais suscetível à falha.

Figura 10 – Exemplo de uma rede viária urbana vulnerável

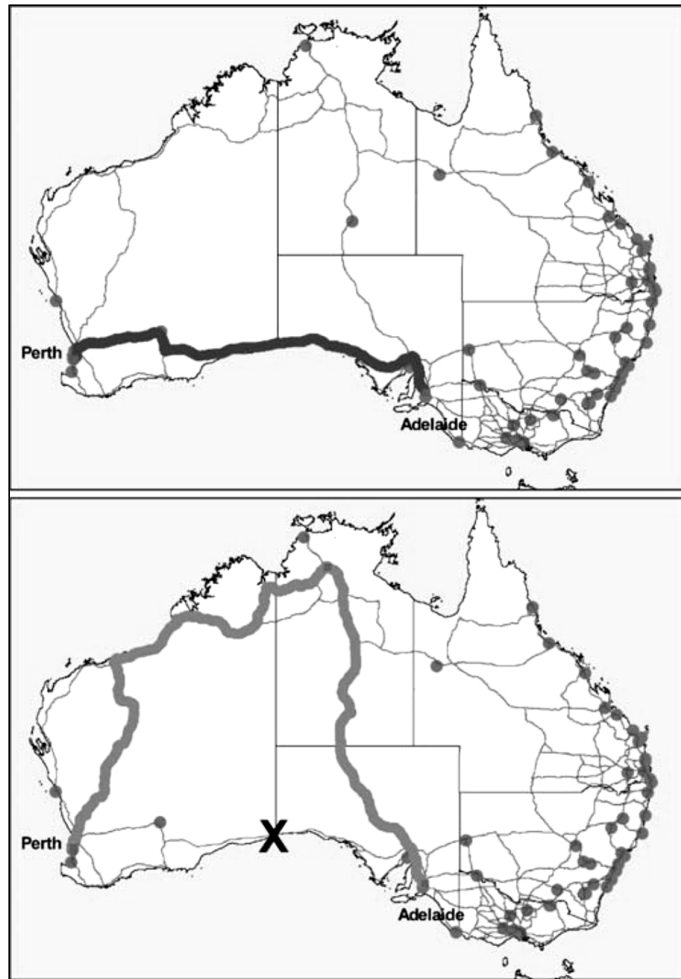


Fonte: Sullivan *et al.* (2010).

Outro exemplo de vulnerabilidade está presente na Figura 11, representando um sistema viário Australiano. D'Este e Taylor (2001) utilizaram essa ilustração como forma de elucidar uma potencial consequência de uma falha na conexão de arcos de uma rede de transportes. No caso, representou-se uma rodovia que conecta as cidades de Perth e Adelaide e que fora interrompida por uma inundação. A probabilidade que a rota em questão seja afetada é reduzida, mas não zero, tanto que o evento já ocorreu em outra ocasião. Com isso as medidas estabelecidas de confiabilidade da rede não indicam qualquer problema grave com o sistema, no entanto as consequências dessa falha são relevantes.

Nesse exemplo, a falha no arco envolve uma rota alternativa que aumenta a distância percorrida em cinco mil quilômetros, forçando o cancelamento da viagem ou um aumento de custo exponencial para o usuário do sistema.

Figura 11 – Atributos de desempenho do sistema



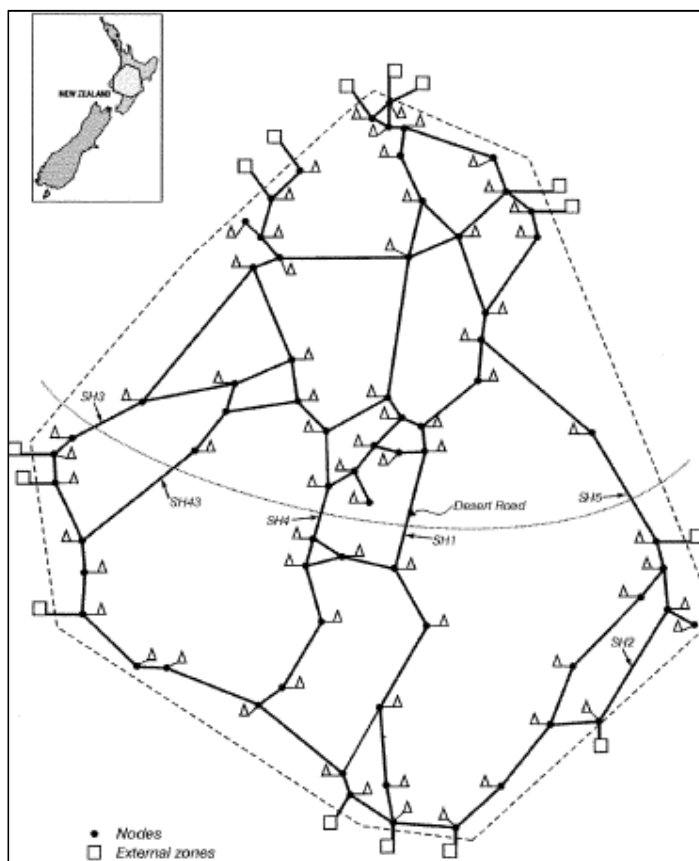
Fonte: D'Este e Taylor (2001).

Nicholson e Dalziell (2003) apresentam um exemplo similar de análise da vulnerabilidade mediante falhas nos arcos de uma rede viária no centro da ilha norte da Nova Zelândia. Tal região está sujeita a nevascas e erupções vulcânicas, ou seja, eventos naturais de baixa recorrência. No trabalho foram simuladas falhas nas vias *Desert Road* e demais vias complementares (ver Figura 12) de forma que as viagens fossem redistribuídas por outros arcos complementares. Conforme passagem,

Quando certos *links* da rede são fechados, as viagens que utilizavam esses *links* precisam ser redistribuídas para outras rotas e custo dessas novas rotas irá exceder o custo das rotas iniciais, desde que não haja mudanças no número de viagens entre as zonas. (NICHOLSON; DALZIELL, 2003, p. 58, tradução nossa).⁶

Por fim, elencando os cenários (arcos interrompidos) de acordo com o aumento do tempo do trajeto total. Dessa forma, priorizam-se ações nos arcos de maior vulnerabilidade da rede.

Figura 12 – Rede de transportes da Nova Zelândia



Fonte: Nicholson e Dalziell (2003).

Acerca de eventos de baixa probabilidade de ocorrência, Tatano e Tsuchiya (2007) desenvolveram um quadro analítico para estimar as perdas econômicas para a rede de transportes decorrentes de um terremoto. Dois tipos de redes foram analisados: transporte de cargas em rodovias e o transporte ferroviário de passageiros. Analisou-se o cenário pré-

⁶ Traduzido do inglês: When some *links* in the network are closed, trips using those *links* have to be redistributed to other routes, and the costs on the new routes will exceed the costs on the original routes, provided there is no change in the numbers of trips between the zones.

catástrofe (com o equilíbrio vigente) e o cenário pós-catástrofe, mensurando, desta forma, os impactos. Utilizou-se, para isso, um Modelo espacial de equilíbrio geral. Trata-se de um modelo cujo propósito é estimar perdas (econômicas ou não monetárias) após efeitos de catástrofes.

Complementar à vulnerabilidade, diversos autores analisam a confiabilidade da rede viária como forma de caracterizá-la, ou seja, retratar o seu estado atual e subjugar-lo a um desempenho esperado. Conforme será abordado no item seguinte.

4.3 Atributo da confiabilidade

Bell (2000) apresenta a seguinte definição de confiabilidade da rede: “Uma rede é confiável, se os custos de viagem esperados são aceitáveis, mesmo quando os usuários são extremamente pessimistas sobre o estado da rede” (BELL, 2000, p. 534). Immers *et al.* (2004) realçam que um sistema de transporte é considerado confiável quando o tempo de viagem experimentado não é muito diferente do tempo de viagem esperado para um trecho ou conjunto de rotas. Apesar de parecerem dissemelhantes, ambas definições relatam que a confiabilidade de um arco, ou da rede no caso de se considerar o somatório dos arcos, está relacionada com a variabilidade do tempo de viagem. No caso, quando a variância é pequena, independentemente do carregamento da via o usuário experimentará um tempo de viagem dentro do esperado.

Para Jenelius *et al.* (2006), dada a importância das redes de transporte para a logística (notadamente a filosofia de produção *just-in-time*) e para viagens de negócios, a confiabilidade das redes de transporte é um interesse chave dos usuários do sistema de transporte e, portanto, dos planejadores em todos os níveis, tanto do setor público quanto de setores privados.

Na visão de Taylor *et al.* (2006), as abordagens convencionais para a confiabilidade da rede de transportes se tem centrado sobre a conectividade da rede, o tempo de viagem e a capacidade. “Enquanto isso fornece informações valiosas sobre determinados aspectos do desempenho da rede, os argumentos de confiabilidade com base em probabilidades e conectividade absoluta podem obscurecer os potenciais problemas de rede” (2006, p. 270). Nesse contexto, os autores discorrem acerca da importância da análise ampla do problema, através do diagnóstico de causa e efeito dos dados obtidos, não somente uma análise pura do indicador.

Para Chen *et al.* (1999) medir a confiabilidade de uma rede é difícil, pois envolve tanto a infraestrutura física como o comportamento do usuário. Tal pensamento corrobora com o pensamento de Immers *et al.* (2004), onde nem todos os usuários atribuem o mesmo valor para a confiabilidade do sistema de transportes. Para os autores, os fatores abaixo intervêm no julgamento do usuário acerca da rede:

- a) estilo de vida do viajante;
- b) propósito da viagem;
- c) característica da atividade no destino;
- d) risco de um desvio no tempo da viagem e as consequências atreladas;
- e) possibilidades para compensar o tempo perdido.

Isso significa que a confiabilidade da rede é dependente de um dado nível de serviço e que a aceitabilidade dessa medida de desempenho sofre variações a depender do ator de interesse. Notadamente, os usuários diretos que estão substancialmente envolvidos com a confiabilidade são mais dependentes do nível de serviço da rede (*idem*, 2004). Nesse âmbito, os atores de interesses são:

- a) o usuário da via, exigindo um tempo de viagem confiável;
- b) o gerente da rede, responsável pela qualidade das operações de tráfego (velocidade, circulação, segurança, conforto, etc.);
- c) outras autoridades da rede, porque seu sistema pode, eventualmente, servir de alternativa em caso de distúrbios;
- d) serviços públicos (como os operadores de transportes públicos) e serviços de emergência;
- e) serviços privados, tais como transportadoras, pois a eficiência de seus serviços é dependente da confiabilidade do sistema.

Cada ator de interesse, sob uma diferente ótica, aborda a confiabilidade de uma rede de transportes. Apesar de tratar do mesmo objeto, a complexidade de cada segmento (nível de serviço, tipo de operações, custos diferentes, propósitos distintos, etc.) torna inviável traduzir em um índice de desempenho que atenda satisfatoriamente a todos os atores. Essa complexidade, traduzida no conflito de interesses entre os diversos atores, é característica imutável de um sistema de transportes urbano.

Nicholson e Dalziell (1997) propõem que a não-confiabilidade (inverso da confiabilidade) advém de duas razões:

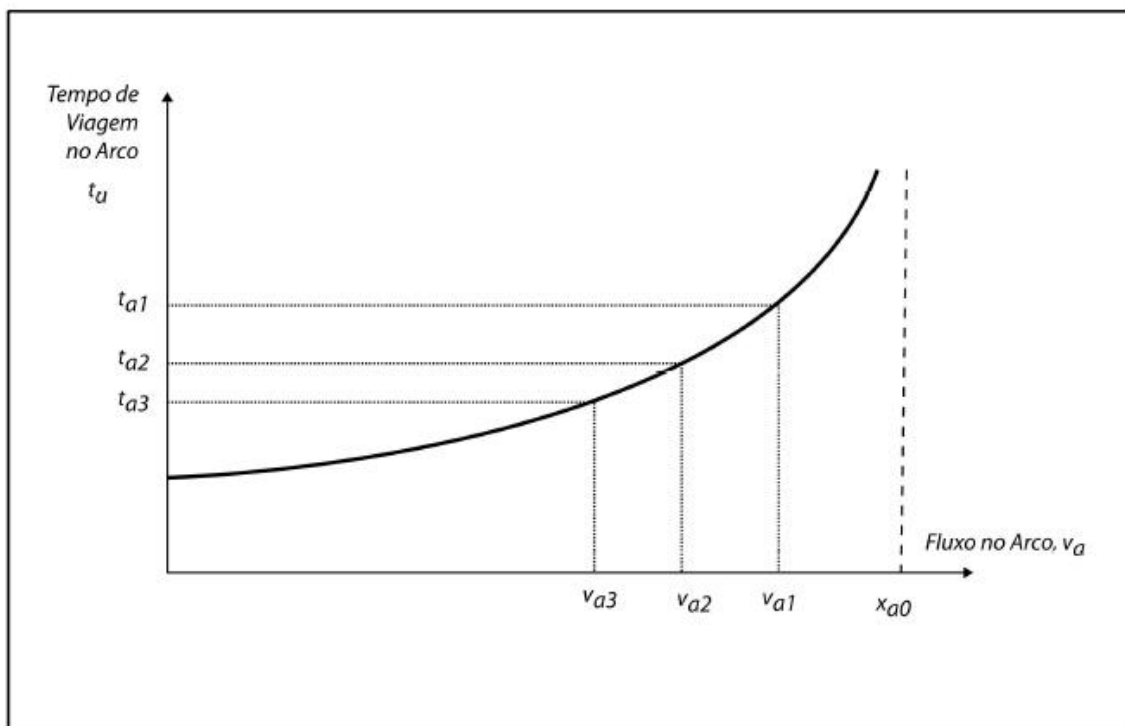
- a) variações na demanda;
- b) variações na capacidade.

O elemento de maior importância em ambas razões é a oscilação do tempo de viagem.

4.3.1 Variações do tempo em função do volume

Para Oliveira (2012), em estudos de transportes, o conceito de confiabilidade envolve a confiança que se tem no funcionamento adequado do sistema de transportes, usualmente associado à inferência do tempo de viagem. Ou seja, mediante intervalo de tempo de observação se avalia o quanto o tempo de viagem entre cada origem-destino oscila em torno de um tempo padrão. Nicholson e Dalziell (2003, *apud* OLIVEIRA, 2012) apresentam uma relação do tempo T_a em função do fluxo V_a , ou volume (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo (volume) de tráfego em um arco



Fonte: Nicholson e Dalziell (2003, *apud* OLIVEIRA, 2012, p. 22).

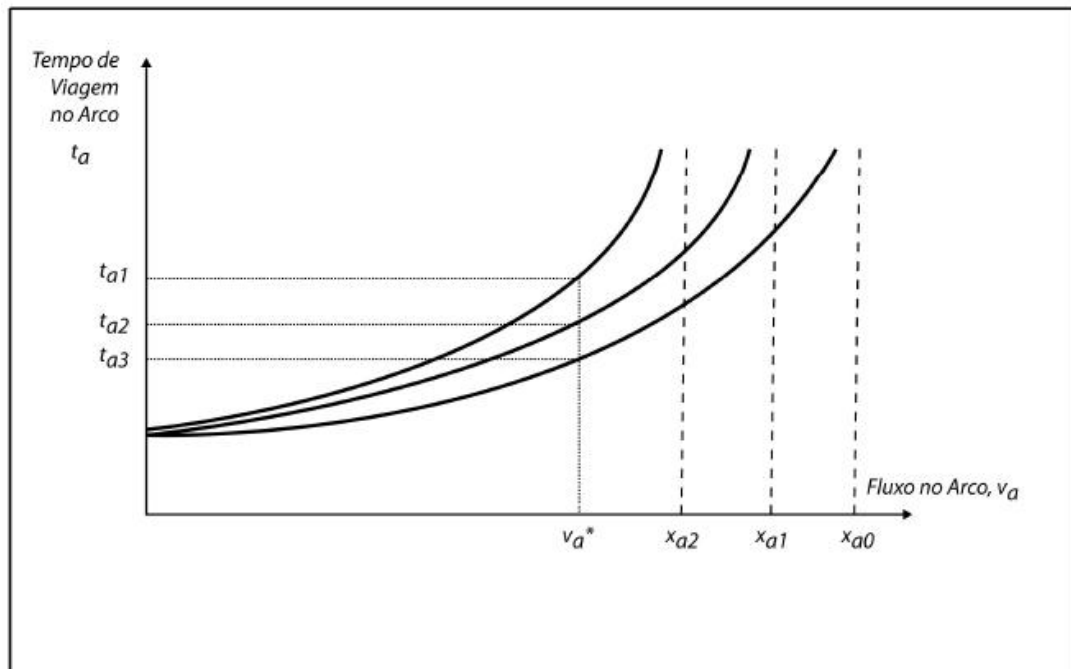
Nessa vertente, o tempo de viagem T_a varia conforme o fluxo (ou volume) V_a oscila no arco. O tempo padrão é estabelecido conforme o nível de serviço aceito pelos diversos atores

do sistema. Por consequência, requer também a experiência do modelador com o fenômeno e a existência de dados precisos.

4.3.2 Variações do tempo em função da capacidade

D'este e Taylor (2001) afirmam que a confiabilidade da capacidade pode ser definida como a probabilidade de uma rede acomodar com sucesso um determinado nível de demanda, estando a rede em estado normal ou degradado, ou seja, trata-se de uma relação entre oferta e demanda. Para Nicholson e Dalziell (2003), aumentos sucessivos na capacidade interferem proporcionalmente no tempo da viagem, dado um fluxo constante. A relação pode ser vista no Gráfico 3, onde demonstra as curvas de variações do tempo T_a dado aumentos sucessivos na capacidade X_a e mantendo o fluxo V_a constante.

Gráfico 3 – Variação do tempo de viagem em função do fluxo de tráfego (volume) e da variação da capacidade em um arco



Fonte: Nicholson e Dalziell (2003, *apud* OLIVEIRA, 2012, p. 22).

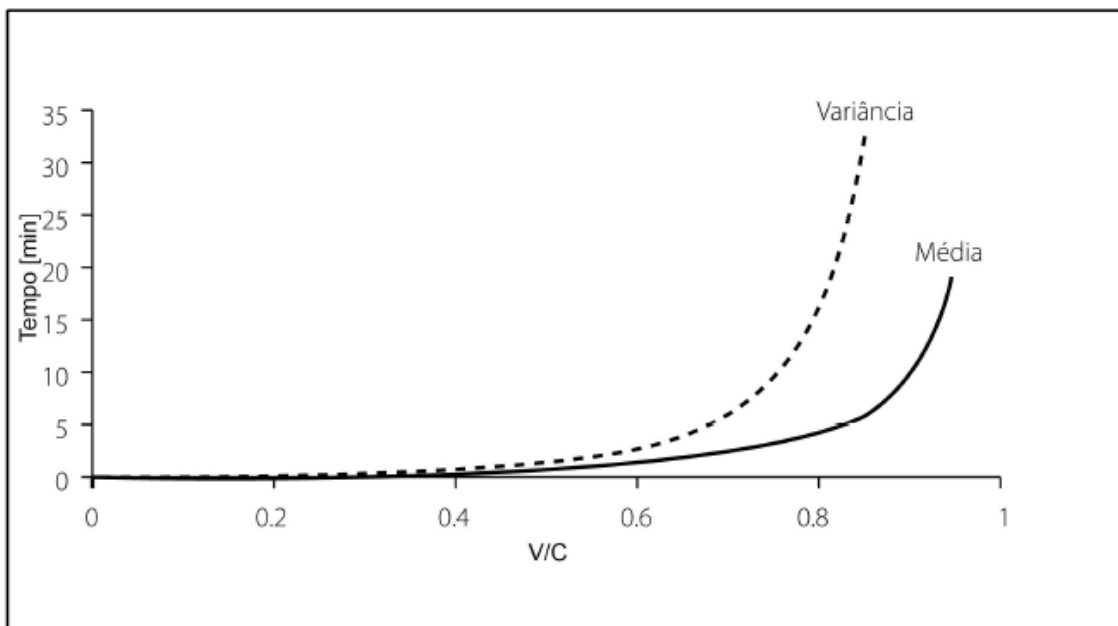
Nesse âmbito, o tempo é medido de forma indireta, haja vista que o objetivo da análise é voltado para a estrutura da rede (como ela se comporta mediante acomodações

sucessivas de veículos novos nas vias?). Outra análise possível no âmbito do atributo da confiabilidade seria relacionar a variância do tempo de viagem com o grau de saturação da via.

Desta forma, Nicholson e Dalziell (2003, *apud* OLIVEIRA, 2012, p. 23) apresentam um gráfico que considera no eixo das ordenadas o tempo médio de viagem e nas abscissas a relação de volume (V) sobre a capacidade (C). Quanto maior for a relação V/C , mais intenso será o congestionamento e maior o tempo de viagem observado. Conforme demonstrado no Gráfico 4.

O gráfico difere do primeiro, haja vista que passa a incluir a curva de variância do tempo médio de viagem. Observa-se que, dada uma capacidade (C) fixa, quando o volume varia até atingir aproximadamente 80% da capacidade, o tempo médio de viagem aumenta de maneira abrupta. Os autores evidenciam, também, que a variância tem crescimento mais intenso a partir de 60% da capacidade, por isso, a prática padrão ao estimar a capacidade real de um sistema é deixa-lo em 80% da capacidade teórica (NICHOLSON; DALZIELL, 2003).

Gráfico 4 – Média e variância do tempo de viagem em função do grau de saturação do tráfego (V/C)



Fonte: Nicholson e Dalziell (2003, *apud* OLIVEIRA, 2012, p. 23).

A explicação para a maior variância no tempo de viagem quando o volume de tráfego aumenta pode ser explicada pela maior susceptibilidade nessas situações aos incidentes que ocasionam congestionamentos.

4.3.3 Métodos de contingência

Existem vários métodos para melhorar a confiabilidade de uma rede (NICHOLSON; DALZIELL, 2003), os quais incluem:

- a) melhorar a confiabilidade dos componentes da rede (ex. substituindo ou fortalecendo pontes);
- b) melhorar a configuração da rede (ex. construir novos arcos auxiliares);
- c) possuir componentes reservas, os quais são ativados após uma degradação do componente original (ex. pontes temporárias, serviços aéreos emergenciais);
- d) monitorar elementos críticos, detectando degradações a alertar aos usuários acerca das alternativas;
- e) empreender regularmente manutenções preventivas nas vias;
- f) identificar prioridades na prevenção de elementos da rede degradados para minimizar o impacto socioeconômico e otimizar a implantação de recursos para reparo.

Ainda segundo os autores, tradicionalmente os planejadores lançam mão da primeira alternativa.

Observa-se que o conceito de confiabilidade, assim como o de vulnerabilidade, sofre influência de perturbações que (a depender da característica e da intensidade) se enquadram mais em um ou outro atributo. Por exemplo, distúrbios recorrentes e que afetam com menor intensidade a capacidade do arco tendem a gerar aumento no tempo de viagem. Essa característica se enquadra no atributo de confiabilidade da via, uma vez que não houve interrupção, ou drástica redução, no fluxo.

No caso da vulnerabilidade, a causa estudada, normalmente, envolve eventos que geram maior impacto à via e são menos prováveis de ocorrer (relação de probabilidade e consequência). Para ambos os casos, a estimação da probabilidade de ocorrência dessas perturbações nos arcos da rede de transportes é o atributo do Risco.

4.4 Atributo do risco

A vulnerabilidade está intrinsicamente relacionada ao conceito de risco. De acordo com uma percepção geralmente aceita, o risco inclui dois componentes: probabilidade e consequência. As consequências geralmente dizem respeito a vida, saúde e ambiente. Se a esses problemas são atribuídos valores monetários, as consequências também podem ser expressas como custos.

Para Nicholson e Dalziell (2003) o risco de uma falha é produto da probabilidade de ocorrência e da consequência desse evento. Nesse contexto, o gerenciamento e avaliação de riscos trata-se de um processo para identificar eventos perigosos, mensurar suas probabilidades e as consequências. Dessa maneira, tomam-se ações para prevenir riscos considerados inaceitáveis.

Patterson e Apostolakis (2007) desenvolveram um método denominado *Geographic Valued Worth* (GVW) para avaliação de riscos e tomada de decisão em redes na prevenção a ataques terroristas. O resultado do método são mapas de riscos de áreas geográficas suscetíveis a ataques.

Para Davidson e Lambert (2001, *apud* SOHN, 2005, p. 494), a avaliação dos riscos consiste em:

- a) quantificar o potencial do risco para cada localidade;
- b) categorizar por ordem de magnitude do risco.

Os fatores considerados no cálculo do índice estão: relacionados com perigo, com a exposição, com a vulnerabilidade e resposta de emergência e com a capacidade de se restaurar. Pesos diferentes são atribuídos aos diferentes fatores de acordo com a magnitude. Segundo os autores, o índice é esperado para ajudar a decisão de alocação de recursos entre os municípios.

Nicholson e Dalziell (2003) avaliam o atributo de risco da seguinte forma:

Risco é um indicador mais abrangente, complexo e exigente de confiabilidade, uma vez que requer informações sobre as probabilidades de imprevistos ocorrerem e dos arcs a ser interrompidos. Essa informação pode ser difícil de se obter. (NICHOLSON; DALZIELL, 2003, p. 55, tradução nossa).⁷

⁷ Traduzido do inglês: Risk is a most comprehensive, complex and demanding reliability indicator, as it requires information about the probabilities of hazards occurring and *links* being degraded, and such information can be difficult to obtain.

Os autores relacionam o atributo do risco como parte constituinte do atributo da confiabilidade. Essa proposição corrobora com a visão de que é necessário analisar ambos indicadores concomitantemente e evidencia a complexidade para obtenção do indicador de risco. Contudo, Nicholson e Dalziell (2003) propuseram um método para levantamento dos riscos, cujas etapas são:

- a) identificar os eventos perigosos (ex. nevascas, cinzas de erupções vulcânicas, danificações de vias, terremotos e acidentes entre veículos);
- b) estimar a probabilidade de ocorrência de cada evento relevante à região, utilizando históricos (aliados a distribuição de frequências e simulação de Monte Carlo);
- c) estimar as consequências da ocorrência (incluem os custos aos usuários e de manutenção do arco).

Estimar o risco de falhas nos arcos, consequentemente, pode envolver registros históricos de eventos naturais (ou também eventos causados pelo homem) passíveis de interromper arcos na região em que a rede está inserida, ou se pode utilizar ferramentas estatísticas que meçam a probabilidade de ocorrência de acidentes de trânsito que sujeita a rede viária a interrupções nos arcos.

Nesse sentido, pesquisas relacionadas à segurança viária buscam, dentre outros objetivos, soluções que minimizem exposições a riscos. Para isso, lançam mão de modelos para previsão de acidentes (MPA).

4.4.1 Modelos de previsão de acidentes (MPA)

A modelagem estatística da rede viária vem desenvolver os modelos de previsão de acidentes (MPA) que, entre outros objetivos, buscam aferir as chances de ocorrência de acidentes para determinado trecho, ou interseção, mediante variáveis que expliquem o grau de exposição ao risco.

A exposição ao risco está relacionada ao número de oportunidades para ocorrer acidentes de certo tipo em determinado período ou área (CHAPMAN, 1973). Existem fatores relacionados ao meio ambiente viário, aos usuários e aos veículos que podem se relacionar com essa exposição ao risco (QIN *et al.*, 2004). Logo, aspectos como: volume de tráfego, período do dia, velocidade dos veículos, volume de pedestres, densidade de acessos à via e condições climáticas interagem entre si modificando o nível de exposição ao risco.

A previsão da ocorrência de acidentes de trânsito, usualmente é relacionada a modelos matemáticos que buscam mensurar o valor específico de um índice de acidentes, utilizando para isso, uma série de variáveis que exercem influência significativa para tal ocorrência (CARDOSO; GOLDNER, 2007). Para os autores,

Os fatores influentes em acidentes de trânsito variam de acordo com o meio-ambiente viário e características inerentes aos seus usuários (condutores e pedestres). Os modelos de previsão de acidentes costumam determinar um valor esperado de acidentes (ou taxa de acidentes), com determinadas características, em uma unidade de tempo, num local analisado. Isso é feito por modelos probabilísticos que determinam a frequência com que os acidentes (eventos raros) ocorrem sob determinadas condições. (CARDOSO; GOLDNER, 2007, p. 45).

Nesse contexto, os modelos de previsão de acidentes buscam compreender e explicar as relações de natureza aleatória, de baixa probabilidade de ocorrência, relacionadas aos acidentes de trânsito.

4.5 Distinções entre os atributos

Apesar de tanto a vulnerabilidade como a confiabilidade objetivarem analisar o desempenho, levando em conta alterações e incertezas da rede de transportes, existem diferenças evidentes entre elas. Snelder *et al.* (2012) salientam as dissonâncias entre os atributos de confiabilidade e robustez (ou inverso da vulnerabilidade). Para os autores,

Confiabilidade é voltada para um período médio do tempo de viagem e, portanto, deve ser determinada ao longo de um período mais longo (que vão de alguns dias a um ano). Com a robustez, a ênfase recai sobre o período em que o efeito de uma perturbação específica é perceptível. Centra-se sobre o impacto das perturbações individuais e não tanto sobre as probabilidades de que esses distúrbios ocorrem. (...) No caso de confiabilidade, a ênfase reside na probabilidade de que uma perturbação específica ocorre, e com robustez a ênfase reside no efeito (SNELDER *et al.*, 2012, p. 831, tradução nossa).⁸

Nota-se que a confiabilidade, em sua essência, possui objetivos voltados à probabilidade, ou seja, está intimamente ligada ao conceito de risco, ao passo que a

⁸ Traduzido do inglês: Reliability is geared towards an average spread in the travel time and, therefore, must be determined over a longer period (ranging from several days to a year). With robustness, the emphasis lies on the period in which the effect of a specific disturbance is noticeable. It focuses on the impact of single disturbances and not so much on the probabilities that these disturbances occur. (...) In the case of reliability, the emphasis lies on the probability that a specific disturbance occurs, and with robustness the emphasis lies on the effect.

vulnerabilidade se associa à habilidade que a rede de transportes possui em operar adequadamente.

No entanto, os estudos acerca da probabilidade relacionada à confiabilidade recaem sobre a probabilidade de o tempo de viagem vir a se enquadrar dentro de uma média esperada para um arco específico. Por exemplo, um indicador g para desempenho da rede de transportes (tempo, velocidade média etc.) assume seguir uma distribuição $F(g)$. Então os pesquisadores que medem a confiabilidade analisam a probabilidade de g ser maior do que um valor de interesse h , ex. $P(g) \geq h$.

Li (2008), em sua tese, exemplifica a distinção entre ambos os atributos através do seguinte exemplo: pesquisadores podem analisar as chances de uma viagem entre o ponto A ao ponto B utilizar mais de 1 hora em diferentes períodos do dia, lançando mão de diferentes caminhos. Nessa conjectura, os usuários podem escolher a hora da partida, ou caminho, de acordo com tais informações, assim como a hora de chegada, visando reduzir as chances de chegar muito cedo ou muito tarde. Logo, dados históricos da viagem tem importante função na análise da confiabilidade. Em contraste, a robustez (ou inverso da vulnerabilidade) refere-se a situações circunstanciais relacionadas a eventos excepcionais.

Caso haja um acidente no arco principal que liga o ponto A ao B, criando longas filas, os usuários podem ainda alcançar o ponto B, utilizando rotas alternativas, em menos de 1 hora? Diferentemente do problema da confiabilidade, uma vez que as situações são excepcionais e inesperadas, os usuários encontrariam uma situação não familiarizada, assim suas experiências anteriores podem não ser úteis.

Para efeito desse trabalho (considerando uma viagem entre dois pontos – A e B) é sintetizado que:

- a) confiabilidade: relaciona-se à probabilidade de o tempo (ou distância, custo, etc.) entre os pontos A e B se manter dentro de um índice esperado (baseado na sua distribuição de frequências);
- b) vulnerabilidade: caso haja uma circunstância inesperada (acidente, inundação, etc.) que afete uma ou mais conexões que ligam os pontos A e B, medir quanto será acrescido no tempo (distância ou custos) total dessa viagem, ou mesmo se haverá viabilidade de prosseguimento da viagem;
- c) risco: remete, exclusivamente, a medir a probabilidade de uma conexão vir a falhar.

Em vista disso, observa-se que os três atributos estão intimamente relacionados. Uma análise feita em um atributo, necessariamente envolve, ou deveria envolver, aspectos dos

demais. Dessa forma, uma análise holística desses atributos da rede viária contribui para uma escolha de rota (no caso de transportadores), ou para outras áreas do conhecimento e atuações, de maneira mais robusta.

4.6 Classificação dos distúrbios

Na literatura acerca de confiabilidade e atributos semelhantes, muitas vezes é feita uma distinção entre o distúrbio recorrente (como congestionamentos em intervalos semanais) e distúrbios não recorrentes (tais como acidentes, inundações, terremotos e outros eventos da natureza). A essência do grau de recorrência é que fornece informações sobre a previsibilidade do evento (SNELDER *et al.*, 2012). Nesse contexto, Knoop (2012) colabora ao salientar,

Um incidente no horário de pico, em que um caminhão está envolvido, poderia causar congestionamento grave em muitos arcos os arredores do local do acidente. Outras causas menos frequentes de interrupções são ataques os terroristas, ou desastres e calamidades, (...). Todas as interrupções causam atrasos, o que é indesejável para os usuários da via. As autoridades rodoviárias necessitam saber quais são os elos mais vulneráveis da sua rede viária, pois isso lhes permite proteger ou melhorar essas ligações ou partes de sua rede. (KNOOP *et al.*, 2012, p. 843, tradução nossa).⁹

Apesar de representarem incidentes de baixa frequência, ou baixa probabilidade de ocorrência, existe uma divisão no que compete ao intervalo de tempo desses distúrbios. Em um contexto urbano, fenômenos naturais tendem a ser substancialmente mais escassos do que ações causadas pela ação do homem. Na modelagem da confiabilidade, tal distinção é fundamental para atribuir probabilidades de ocorrências e nível de serviço do fenômeno que está sendo modelado.

4.7 Indicadores de vulnerabilidade e confiabilidade

Comumente, os indicadores relacionados à vulnerabilidade permitem caracterizar a importância de cada arco em uma rede viária, objetiva-se assim criar um ranking de arcos que permita desenvolver medidas de contingência de acordo com sua importância para a rede viária.

⁹ Traduzido do inglês: an incident in the peak hour in which a truck is involved could cause severe congestion on many roads in the surroundings of the accident location. Other less frequently occurring causes of disruptions are (terrorist) attacks, or disasters or calamities, (...). All disruptions cause delays, which is undesirable for road users. Road authorities want to know the most vulnerable *links* of their network because this enables them to protect or to improve those *links* or parts of their network.

Em uma rede viária urbana é comum a existência de múltiplas rotas para a satisfação de uma demanda entre origem e destino. Para Jenelius *et al* (2006) o custo da viagem (influenciado pela demanda ou não) é certamente um importante indicador da função de utilidade da rede. A variação do custo (em termos de tempo, combustível, distância etc.) influi no comportamento do usuário quanto a escolha da rota em uma rede em equilíbrio.

Neste tópico, pretende-se demonstrar os indicadores diretamente associados à vulnerabilidade e confiabilidade do arco e o seu impacto na rede viária, conforme classificação elaborada na pesquisa de Oliveira (2012). Salienta-se a importância da medição do tempo na elaboração dos indicadores. “Como o principal parâmetro associado ao aspecto confiabilidade é tempo de viagem, todos os indicadores levantados estão de alguma forma levando em consideração esse aspecto” (2012, p. 58).

4.7.1 Índice de Robustez da Rede – NRI

O *Network Robustness Index* (NRI) foi desenvolvido por Scott *et al.* (2006) e objetiva identificar a importância crítica de um arco em relação à rede viária. Para isso, baseia-se no delta de parâmetros de custo de viagens, por exemplo, o tempo de viagem acrescido associado ao re-roteamento de todo o tráfego no sistema caso determinado arco seja interrompido.

A mudança das rotas decorrente de um evento intempestivo pode sobrecarregar *links* alternativos, seja da mesma zona ou de zonas mais distantes. Nesse tocante, a formulação do indicador é descrita abaixo:

$$NRI_a = ca - c \tag{5}$$

Em que

NRI_a = Índice de Robustez da rede para o arco a;

c_a = custo do tempo de viagem da rede, após remoção do arco a;

c = custo do tempo de viagem com a rede intacta.

Desta forma, tem-se que:

$$ca = \sum_a t_a v_a \delta_a \tag{6}$$

e

$$c = \sum_a t_a v_a \quad (7)$$

Onde

t_a = tempo de viagem no *link* a ;

v_a = volume de tráfego no *link* a ;

$\delta a = 1$ se a não for o *link* removido; 0 caso contrário.

Isto posto, o NRI associa o custo como sendo uma relação entre tempo de viagem e volume de tráfego. O indicador não considera a redução da capacidade do arco, mas sim a exclusão por inteiro, o que pode não representar fidedignamente uma situação real de evento intempestivo no arco.

4.7.2 Índice de Robustez da Rede-modificado – NRI-m

O índice de robustez da rede modificado (NRI-m), desenvolvido como uma modificação do índice de robustez da rede (NRI), considera a redução na capacidade do arco ao invés da completa interrupção. Tal proposição o torna mais fidedigno aos eventos reais de falhas nos arcos.

Elaborado por Sullivan *et al.* (2010) o NRI modificado produz resultados que são independentes do grau de conectividade de rede, ou seja, não necessita de uma vasta quantidade de nós e arcos e podem ser utilizados para avaliar as redes com arcos isolados, uma vez que ainda se consegue manter o *status* de rede em equilíbrio.

Um arco isolado se trata de uma ligação que corta completamente uma porção da rede se for removido. Caso o corte seja completo, não há como analisar cenários de tempos de viagem para fluxos com destinos àqueles arcos isolados. Portanto, ao simular um contexto de transporte baseado no completo corte do arco equivale a sempre considerar o pior caso possível, dissociando-se dos eventos presentes na realidade do dia-a-dia.

Para Sullivan *et al.* (2010), até o momento, os pesquisadores têm feito pouco para distinguir entre as abordagens metodológicas utilizadas para examinar interrupções ocasionadas por eventos catastróficos ao longo prazo *versus* eventos de menores impactos do dia-a-dia, isto

é, interrupções de rede mais comuns. Enquanto eles são menos graves do que eventos catastróficos (desastres naturais, falhas de pontes etc.), eventos como a inundação parcial, a redução de visibilidade, acidentes e a deterioração do pavimento ocorrem em uma base regular e reduzem a capacidade de tráfego operacional em *links* afetados.

Matematicamente o NRI-m baseia-se nos mesmos algoritmos do NRI, apenas passa a considerar a redução do volume de tráfego V_a (Equação 6) na ocorrência de acidente, ao invés do completo corte. Para maior aprofundamento acerca do NRI-m, consultar o trabalho de Oliveira *et al.* (2014).

4.7.3 Índice de Erath *et al.*

Desenvolvido por Erath *et al.* (2010), o indicador busca mensurar o impacto obtido na rede viária, conseqüentemente os efeitos de congestionamento, decorrentes da interrupção de um arco. Para os autores a pesquisa mostrou uma correlação significativa entre a relação volume/capacidade e o NRI.

Para os autores, no campo do gerenciamento do risco de sistemas as conseqüências de um desempenho inadequado pode assumir duas formas diferentes:

- a) conseqüências diretas (CD) para o objeto componente exposto na forma de danos estruturais, incluindo os custos de reparação necessários para retornar o objeto danificado ao seu estado de pré-falha;
- b) conseqüências indiretas (CI) ao tráfego de transporte por restringir ou negar completamente o fluxo de tráfego, incluindo o tempo de viagem adicional e os custos da distância de deslocamento.

Erath *et al.* (2010) não fornecem um índice de vulnerabilidade, propriamente dito, mas desenvolvem uma metodologia que permite hierarquizar os arcos de uma rede viária com base nas conseqüências da obstrução de cada um. Logo, tal metodologia se enquadra nas conseqüências indiretas definidas pelos autores, envolvendo o tempo de viagem adicional e os custos da distância de deslocamento. Devido ao caráter monetizado desta conseqüência, o valor levantado pode ser visto como um índice: quanto maior for, maior será a conseqüência da interrupção da ligação e, desta forma, mais vulnerável está a rede à essa interrupção (idem, 2012).

A formulação matemática é descrita na Equação 8. Em geral se trata de uma subtração entre o cenário pós-incidente *versus* o cenário pré-incidente, acrescido de um fator de ponderação que considera a demanda entre as zonas de origem e destino (OD).

$$\Delta TT_a = \sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^a - c_{ij}^0) \quad (8)$$

Em que

ΔTT_a = delta entre tempos totais com e sem interrupção do arco a;

w_{ij} = fator ponderador, numericamente igual à demanda entre as zonas i e j;

$c_{ij}^{(o)}$ = tempo de viagem entre i e j em condições normais;

$c_{ij}^{(a)}$ = tempo de viagem entre i e j com o *link* a interrompido;

$$\Delta TDl = \sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (d_{ij}^l - d_{ij}^0) \quad (9)$$

Onde

ΔTD_a = delta entre distâncias totais com e sem interrupções;

w_{ij} = fator ponderador, numericamente igual à demanda entre as zonas i e j ;

$d_{ij}^{(o)}$ = distância entre i e j em condições normais;

$d_{ij}^{(a)}$ = distância entre i e j com o *link* a interrompido.

$$CI = \Delta TTl * ctt + \Delta TDl * ctd \quad (10)$$

Onde:

CI = Índice de Vulnerabilidade de Erath;

ctt = custo do tempo de viagem;

ctd = custo de deslocamento.

O índice considera, então, o conceito de custo generalizado, no qual as consequências da interrupção de uma ligação se dão através do aumento no tempo e na extensão de viagem. Ao converter o acréscimo do tempo e da distância de viagem em aspectos monetários, tem-se o impacto econômico da falha na rede, onde se pode desdobrar em diversas análises secundárias.

4.8 Modelos de vulnerabilidade e confiabilidade

Observa-se que a vulnerabilidade e confiabilidade são dois conceitos relacionados, mas apresentam diferenças básicas. A vulnerabilidade da rede diz respeito às fraquezas da rede e as consequências econômicas e sociais dessas falhas, não tanto para a probabilidade de ocorrência das falhas. Para Snelder *et al.* (2012) isso não significa que a probabilidade de uma perturbação não é importante. Em uma visão holística, ou seja, do funcionamento de todo o sistema, esta probabilidade é de grande relevância. Se a probabilidade de ocorrerem perturbações pode ser reduzida, haverá um grande efeito sobre o tempo de viagem médio e a confiabilidade desse tempo de viagem. Neste caso, a robustez do sistema possui menor importância.

Na literatura a vulnerabilidade da rede rodoviária pode ser classificada em relação ao tipo e variedade de cenários que são estudados (JENELIUS *et al.*, 2012). Nos tópicos seguintes será exposto o conceito do custo e como é inserido nos modelos de rede de transportes, além de expor os modelos de vulnerabilidade/confiabilidade desenvolvidos por pesquisadores.

4.8.1 Impedâncias

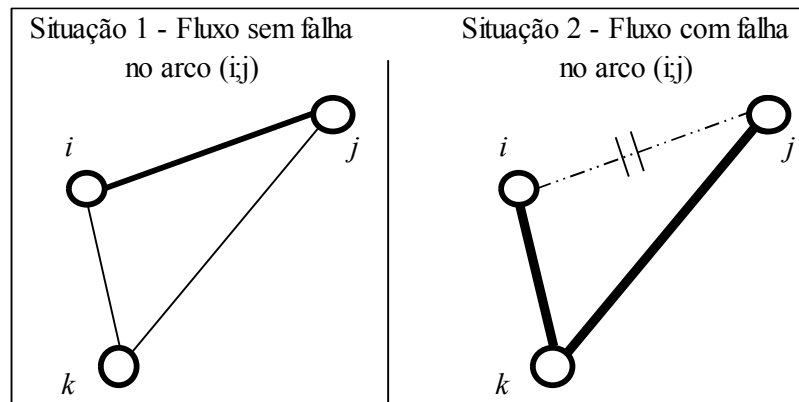
Os custos podem, também, ser interpretados a partir do conceito de vulnerabilidade em que são identificados e analisados sob a forma de indicadores. Para Oliveira *et al.* (2013), a função dos indicadores de vulnerabilidade é, medir, de forma objetiva, o quão vulnerável é uma rede viária ou, então, medir a importância de seus componentes (arcos e nós) para a sua vulnerabilidade. Em relação às variáveis quantificadas, as principais consideradas são o tempo e o custo de viagem, aumentados quando da interrupção total ou parcial de um arco.

A interrupção total ou parcial de um *link* decorrente de uma falha na via, expõe a capacidade do sistema de transporte de operar continuamente sob condição de pressão ou risco. A depender da vulnerabilidade da rede, a região afetada pode sofrer com a interrupção no abastecimento de uma cadeia de suprimentos, onde os custos associados à reprogramação e redirecionamento dos veículos de carga podem ser proibitivos para alguns fornecedores e operadores logísticos (SCOTT *et al.*, 2006).

O efeito de uma degradação da via, natural ou não, é representado na Figura 13, cuja espessura dos arcos representa a intensidade do fluxo existente entre o ponto *i* ao ponto *j*. Verifica-se que em estado de equilíbrio a rede opera conforme a situação 1. Na ocorrência de falha em um dos arcos, nota-se que o fluxo converge para uma rota alternativa através do nó *k*,

conforme situação 2, saturando a sua capacidade. Essa conjuntura de eventos suscita em aumentos de custos, tanto monetários (combustível, desgaste da via e do veículo, a citar) como não monetários (tempo, risco, poluição) para os agentes envolvidos direta e indiretamente na degradação.

Figura 13: Representação da alteração de rota mediante degradação de um arco



Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Tampère *et al.* (2007), a maneira de descobrir quais *links* de uma rede de transporte são vulneráveis é através da simulação de um incidente em cada *link* dessa rede. A próxima etapa se baseia em computar o impacto desse incidente, por exemplo, em termos de tempo de viagem perdido. Nicholson e Dalziell (2003) complementa na simulação de vulnerabilidade o atributo de risco de falha do arco, ou seja, a probabilidade de ocorrência dessa interrupção.

Nesse tocante, Holling (1981, *apud* BERDICA, 2002) afirma que o tratamento referente à vulnerabilidade de uma rede de transporte pode ser considerado sob duas vertentes:

- a) reduzir a probabilidade de ocorrência de falha no *link* (ou seja, diminuir o atributo de risco);
- b) reduzir os impactos decorrentes de uma possível falha no *link*.

A escolha da vertente realizada pelo planejador de transportes se desdobra em estratégias de planejamento e alocações de recursos de formas distintas.

4.8.1.1 Custo generalizado na modelagem de rede de transportes

Jenelius *et al.* (2006) consideram custo generalizado em seu modelo de vulnerabilidade como os tempos de viagem entre os nós demandados. Os autores assumem como simplificação que os tempos de viagem são independentes do carregamento dos arcos da rede de transportes. O custo generalizado pode ser compreendido como a combinação ponderada de diversos elementos como: tempo, distância, e outros gastos monetários.

Taylor *et al.* (2006) adotam variável semelhante onde, para os autores, os tempos de viagem podem ser utilizados como uma medida da mudança do custo generalizado. Sullivan *et al.* (2010) adotam o tempo de viagem total como método para identificação dos *links* mais críticos da rede de transportes, onde se simulam interrupções no fluxo dos arcos para averiguar o impacto em termos de tempo.

Na apreciação de Jenelius *et al.* (2006) o custo generalizado, entretanto, pode vir sob a forma de outras variáveis como: distância, dinheiro etc. Contudo, evidencia-se a utilização do tempo de viagem como variável mais difundida nos modelos de vulnerabilidade. Nesse contexto, a literatura sugere que alterações no tempo de viagem de cada arco representam variações proporcionais do valor do custo generalizado da rede de transportes. Para Yang *et al.* (2000) medidas baseadas em variabilidade de tempos de viagem são úteis para avaliar o desempenho da rede de transportes em termos de qualidade do serviço prestado aos usuários no dia a dia.

Alguns autores como Altıparmak *et al.* (2006), Gen *et al.* (2006), Cheshmehgaz *et al.* (2011) tratam a questão do levantamento dos custos de transporte em modelos de rede baseados no Problema de Transporte. Para Gen *et al.* (2006), o objetivo do Problema de Transporte é encontrar a rota de transporte de um produto homogêneo a partir de várias origens para vários destinos de modo a que o custo total seja mínimo.

Nesse tocante, o custo de transporte em modelos de rede advém sobretudo dos valores do custo do frete (TSAO; LU, 2012). Outra dimensão importante na determinação do custo de transporte é a distância entre os nós, haja vista que a quantidade de combustível depende da distância percorrida pelo veículo (Idem, 2012).

Para efeito desta pesquisa, considerar-se-á os fundamentos dos modelos de avaliação da vulnerabilidade de Taylor *et al.* (2006) e de Jenelius *et al.* (2006) baseados na medição em tempos de viagem. Além disso, determinar-se-á o custo, em valor monetário, da falha dos arcos mediante as etapas:

- a) confrontação do cenário de tempo de viagem inicial com o cenário de tempo de viagem posterior a interrupção;
- b) converter a variável tempo, não monetária, em valores monetários de custos baseados no valor do combustível.

4.8.2 Métodos de estimação da vulnerabilidade

Taylor *et al.* (2006) abordam a vulnerabilidade sob duas vertentes: a dos nós e a dos arcos. Para os autores, um nó da rede é vulnerável se a perda (ou degradação substancial) de um número reduzido de *links* deprecia significativamente a acessibilidade desse nó; um arco da rede é vulnerável se a perda (ou degradação substancial) do arco deprecia significativamente a acessibilidade da rede como um todo ou de nós específicos.

Taylor *et al.* (2006) formularam um modelo baseado no conceito de custo generalizado. Busca-se determinar a medida de vulnerabilidade da rede mediante mudança desse custo entre dois pontos decorrente de uma falha em um ou mais arcos.

Em termos numéricos, considerou-se uma rede $G(N, E)$, onde N é um conjunto de n nós e E um conjunto de m arcos direcionados. Associado à cada arco existe um atributo de custo não negativo. Ainda segundo os autores, $s[ij, G(N, E)]$ se refere ao caminho de menor custo de i a j , isto posto:

$$V_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - e_{rs})] \quad (11)$$

Em que

V_{ijrs} : variação no custo generalizado da viagem entre o nó i e j quando o arco e_{rs} for comprometido;

N : conjunto de n nós;

E : conjunto de m *links*;

e_{rs} : *link* comprometido entre o nó r e o nó s .

Refere-se à diferença entre o caminho de menor custo intacto e o caminho de menor custo sem o *link* que conecta o nó r ao s , e_{rs} . A relação é negativa, pois representa um incremento no custo da viagem na rede degradada. Jenelius *et al.* (2006) desenvolveram um modelo utilizando conceito semelhante, onde o custo da interrupção do *link* é determinado mediante

confrontação do custo entre os nós i e j quando o elemento e falha, $cij^{(e)}$, e o custo inicial, sem falha, $cij^{(0)}$. Nesse contexto:

$$\Delta cij^{(e)} = cij^{(e)} - cij^{(0)} \quad (12)$$

Sendo

$c^{(e)}$: custo com falha;

$c^{(0)}$: custo sem falha.

Ademais, os autores introduzem ao modelo de vulnerabilidade dos *links* o conceito de custo da demanda insatisfeita, considerado mais severo, cujo valor é acrescido ao custo generalizado da rede.

Ao considerar que a medição da vulnerabilidade passa pela redução/obstrução da capacidade dos arcos, medindo o impacto em termos de aumento do tempo da viagem ou de custos monetários, existem na literatura alguns métodos que podem ser utilizados. Dessa maneira, os métodos existentes na literatura para mensurar o atributo de vulnerabilidade podem ser divididos em dois grupos (KNOOP *et al.*, 2012), cuja diferença está na triagem dos arcos a ser testados. O primeiro grupo contém os métodos de cálculos completos, ou seja, onde a capacidade é reduzida para cada arco individualmente. Desta forma, faz-se uma varredura na rede viária para descobrir quais arcos são mais vulneráveis no sistema.

Estes métodos são melhores para analisar a resiliência de uma rede de transportes, uma vez que todos os arcos são testados e elencados conforme o impacto que exercem no sistema, contudo, tal procedimento necessita de uma maior capacidade de processamento de dados.

O segundo grupo utiliza de maneira prévia critérios de arcos para ter uma direção na busca de elos mais vulneráveis. Nessa abordagem, primeiro se selecionam arcos que são possivelmente vulneráveis baseados em critérios específicos (exemplo: uso do solo, topologia, condições de acessibilidade, histórico de desastres, etc.). Para esses *links* uma análise mais detalhada é realizada através da redução da capacidade e, com isso, avalia-se a vulnerabilidade de cada arco. Em todos os estudos, no entanto, o aumento do tempo de viagem ou distância total percorrida da viagem para os motoristas é um componente vital da avaliação (JENELIUS *et al.*, 2012).

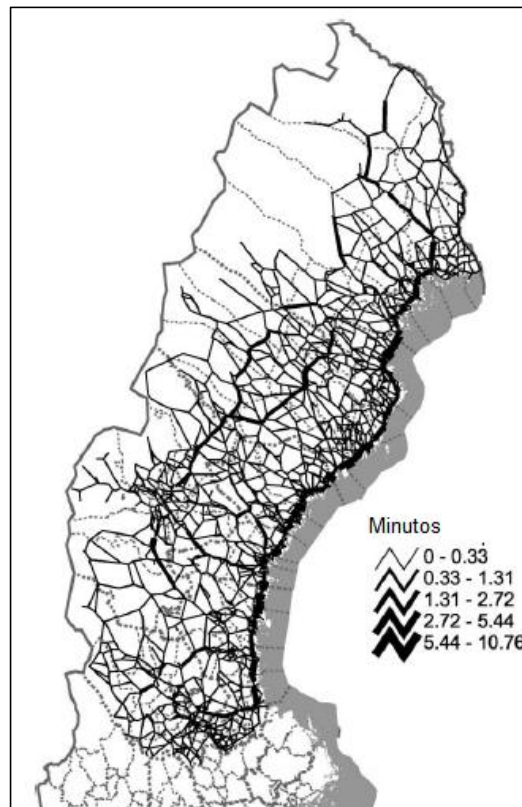
Além das duas formas de aproximação da vulnerabilidade, alguns autores consideram uma terceira forma baseada na Teoria dos jogos. Tal aplicabilidade matemática

serve para identificar os piores cenários possíveis, bem como a melhor resposta para tais cenários (JENELIUS *et al.*, 2012). No entanto, Knoop *et al.* (2012) ressaltam que este método nunca fora aplicado em um ambiente de simulação dinâmica para uma rede viária de tamanho real. Para um melhor aprofundamento do tema, consultar os trabalhos de Bell *et al.* (2008) e Hollander e Prashker (2006).

4.8.4.1 Primeiro grupo

Jenelius *et al.* (2005), em sua pesquisa, medem a importância global de cada arco para uma rede viária Sueca mediante incrementos no tempo de viagem para cada par origem-destino quando a ligação é interrompida. Através de simulações, sem considerar engarrafamentos, chegou-se ao cenário da Figura 14. Quanto maior for a espessura do arco, maior será o tempo de viagem acrescido em decorrência da sua ruptura. Knoop *et al.* (2008) usam a mesma abordagem para calcular as consequências de um bloqueio para cada arco de uma rede viária.

Figura 14 – Aumento nos tempos de viagem mediante simulação completa



Fonte: Jenelius *et al.* (2005).

Corthout *et al.* (2009) mostram um método que se baseia em uma simulação da rede em equilíbrio. Eles somente computam as mudanças no cenário após a ocorrência de um incidente. Este método é mais rápido, contudo ainda carece de sentido na busca dos arcos vulneráveis. Além disso, a escolha de rota é assumida constante, ao passo que os viajantes podem mudar sua rota devido a ocorrência de um incidente.

Scott *et al.* (2006) sugerem o termo Índice de Robustez da Rede (NRI), o qual se alia ao conceito de confiabilidade. Em sua pesquisa, utilizaram-se três redes hipotéticas que simulavam cidades de portes: pequeno, médio e grande. Cada arco foi interrompido separadamente e o tempo de viagem fora medido individualmente.

A robustez da rede pode ser considerada como uma aproximação dos conceitos de vulnerabilidade e confiabilidade. “Alguns autores preferem o termo Robustez para o atributo da rede, correspondente ao inverso da vulnerabilidade” (OLIVEIRA, 2013, p. 4), ou seja, quanto mais robusta for uma rede, menos vulnerável a eventos intempestivos ela será. Para (KNOOP *et al.*, 2012, p.843) “Os termos de robustez e vulnerabilidade são muitas vezes utilizados como opostos e isso também é feito nesta contribuição. Vulnerabilidade descreve a fraqueza de uma rede e a robustez descreve a força de uma rede”.

Isso posto, a robustez da rede é definida como o grau em que a rede de transporte pode funcionar na presença de várias perturbações na capacidade dos arcos (SULLIVAN *et al.*, 2010). Knoop *et al.* apresentam definição semelhante ao afirmar que “Robustez é a capacidade da rede em manter a sua funcionalidade em condições que se desviam das condições normais.” (2012, p. 843). Uma rede “robusta” pode compensar as interrupções nos arcos da rede com relativa facilidade e com apenas ligeiros aumentos nos tempos gerais de viagem de todo o sistema. Uma rede “não robusta” não se ajusta bem a interrupções nos arcos da rede e está sujeita a aumentos substanciais nos tempos de viagem. Na análise de robustez da rede, o rompimento sequencial dos *links* da rede é parte do processo de solução.

Conforme citado no Item 2.2.3, Sohn (2005) analisou os efeitos da perda de acessibilidade da rede viária cuja causa fora inundação. Cada arco fora individualmente interrompido e, utilizando o algoritmo de Dijkstra (1959), foram estimados os caminhos mínimos. Nessa conjectura, cada arco possui um efeito diferente na rede, variando conforme magnitude da distância acrescida e do fluxo de veículos.

Esses experimentos conseqüentemente utilizam maior tempo de processamento dos sistemas, o que pode ser considerado uma desvantagem. Entretanto, a vantagem desse método de varredura completa utilizado por esse grupo de autores está baseado na realização de uma análise completa dos elos da rede.

4.8.4.2 Segundo grupo

Tammaing *et al.* (2005) foram os primeiros a introduzir um método em que fora utilizada esta abordagem, elencando uma listagem prévia de arcos vulneráveis. Tampère *et al.* (2007) também introduziram os seus próprios critérios de seleção. Antes de simular incidentes nos arcos da rede viária, primeiro se obteve uma lista de possíveis arcos candidatos a ser vulneráveis, lançando mão de simulação básica do tráfego na rede, não envolvendo incidentes. A metodologia proposta pelos pesquisadores segue uma série de passos:

- a) elaboração de uma longa lista de arcos da rede vulneráveis;
- b) reduzir a longa lista para uma lista restrita (baseado no risco de ocorrência do evento);
- c) simulação de incidentes nos arcos da lista restrita.

Na primeira etapa metodológica, para composição da lista maior, utiliza-se a formulação matemática baseada na relação de volume/capacidade abaixo:

$$\frac{I}{1 - \frac{I}{C}} \quad (13)$$

Onde

I: volume de veículos;

C: capacidade inicial do arco.

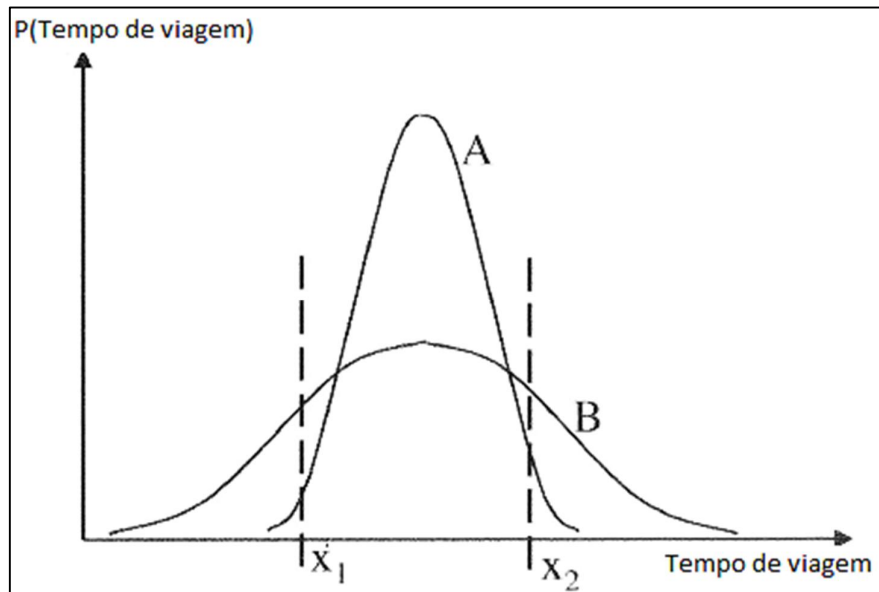
Quando maior for a relação, ou seja, quanto maior for o grau de saturação do arco, maior o fator de impacto que o arco exerce na rede viária. Para reduzir a listagem, os autores utilizaram fatores de risco na triagem, entretanto, consideraram somente a variável de volume de tráfego como estimador do risco de incidentes, o que limita a acurácia da investigação.

4.8.3 Métodos de estimação da confiabilidade

Nicholson e Dalziell (2003) afirmam que a medida estatística clássica da variância do tempo de viagem pode ser utilizada para mensurar o atributo da confiabilidade. Nesse caso, a confiabilidade é máxima quando a variância é nula e se reduz à medida que a variância aumenta.

Conforme Gráfico 5, se um usuário deseja realizar a viagem que dure um tempo x_2 e existem duas opções de rotas (A e B), com valores esperados (médias) iguais, mas a variância do tempo de viagem da rota A é menor do que a da rota B, então a rota com menor variação deverá ser escolhida. Isso se justifica porque a probabilidade de o tempo de viagem superar x_2 é menor na rota A.

Gráfico 5 – Função densidade do tempo de viagem

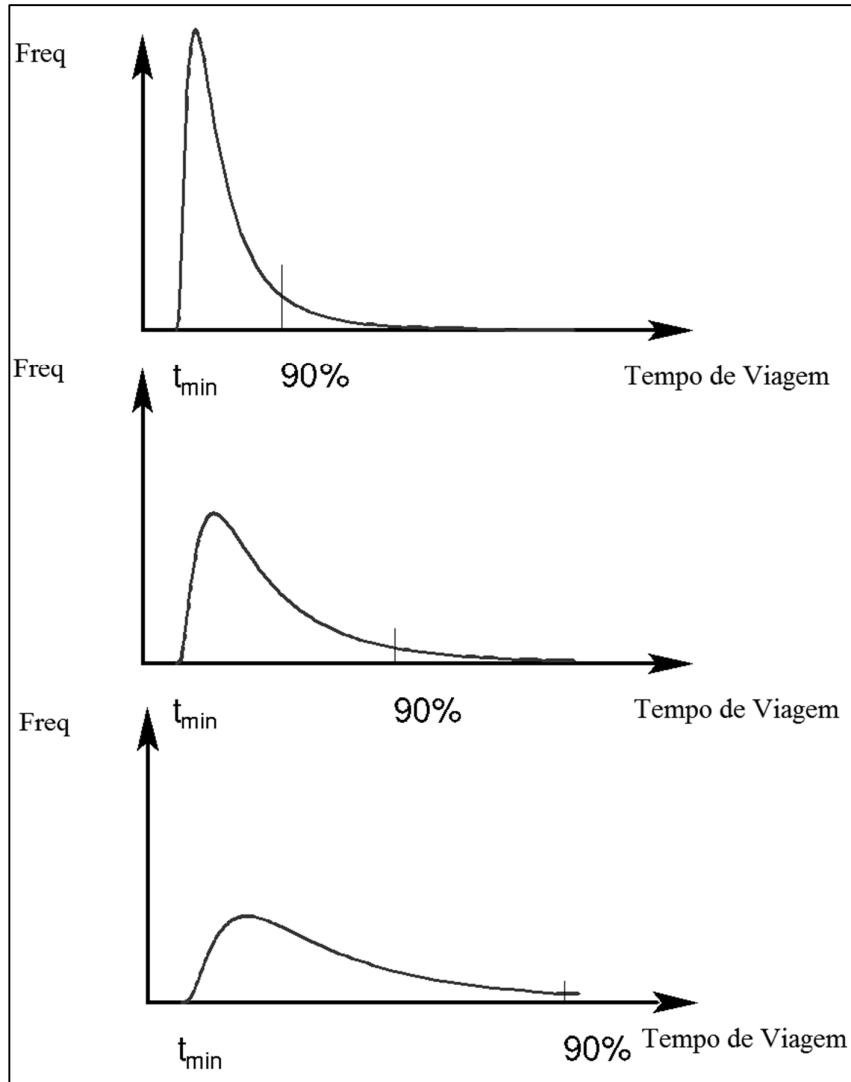


Fonte: Nicholson e Dalziell (2003, p. 54).

Em outra vertente, se o viajante já está atrasado e o tempo limite é x_1 , então o usuário tende a escolher a rota B (com maior variabilidade do tempo de viagem). Tal comportamento se justifica, pois aumentam as chances de ele chegar dentro do intervalo desejado. Ou seja, não necessariamente o caminho de menor variabilidade sempre será a melhor opção de escolha de rota (mais confiável).

O Gráfico 6, evidenciado no trabalho de Immers *et al.* (2004) demonstra alguns exemplos de distribuições de frequências típicas de tempos de viagem. De cima para baixo a situação se torna cada vez menos confiável. Para não chegar atrasado ao seu destino, o usuário preferirá ficar do lado seguro e ter tempo de sobra para sua jornada (ou seja, no intervalo de 90%). À medida que a distribuição de frequências do tempo de viagem se torna mais dispersa, a confiabilidade do arco (ou seja, a probabilidade de o tempo de viagem ficar próximo da média) diminui. Desta forma, quanto maior for a dispersão do arco, menor será a confiabilidade da via e, portanto, menor tende a ser a escolha do usuário pela rota que utilizará esse arco.

Gráfico 6 – Distribuições dos tempos de viagem



Fonte: Immers *et al.* (2004).

A estimação da confiabilidade, à vista disso, passa pela medição dos tempos de viagem dos arcos da rede, utilizando meios diretos, ou indiretos (como dados de tráfego coletados pelo município). A coleta dos dados deverá considerar um número de amostras de \bar{x} suficientemente grande para que a média represente o fenômeno como uma distribuição Normal, tal qual descrito no Teorema do Limite Central (DEVORE, 2006), no qual afirma que toda soma de variáveis aleatórias independentes de média finita e variância limitada é aproximadamente Normal, desde que o número de termos da soma seja suficientemente grande. Dessa maneira, o fenômeno do tempo de viagem atende aos requisitos do TLC, uma vez que as amostras são independentes umas das outras, possui médias finitas e variância limitada. Ao

colher os dados da variável do tempo de viagem, estimar a média e a variância, tem-se a medida da confiabilidade.

Autores como Bates *et al.* (2001) também utilizaram da variância do tempo de viagem como indicador da confiabilidade das rotas, ou dos arcos. Nesse âmbito, inseriram ao tempo de viagem o elemento Tr , variável aleatória maior ou igual a zero, que representa a incerteza inerente às viagens na rede.

4.9 Considerações do capítulo

Os atributos de vulnerabilidade, confiabilidade e risco possuem o desígnio de medir o impacto das falhas nos arcos ou o quão estáveis eles são. Nota-se que para a confiabilidade, a variável do tempo é o foco da análise, mas não necessariamente pode ser a única variável. Em tese, é possível mensurar a variabilidade dos custos (ex. combustível) de forma a medir a confiabilidade da rota, contudo, por não haver métodos sintéticos de medição desse custo em larga escala o tempo ainda é a melhor variável. Nesse caso, a alternativa é medir o custo variável (dentro do frete-peso) em função da variabilidade do tempo.

A vulnerabilidade, no entanto, pode ser aferida ao medir diretamente o aumento do custo variável em função de um evento intempestivo na rota, basta medir a variação da quilometragem percorrida (ou tempo dispendido) e converter em valores monetários. Assim, é possível incorporar a fragilidade da rede no planejamento de médio/longo prazo através de planos de contingência (caso a rede falhe, qual rota alternativa tem menor custo?).

Entende-se que para efeito de simplificação, os custos variáveis inerentes ao transporte de cargas que melhor se adequam a modelagem da rota são: combustível, pneu e óleos lubrificantes. A escolha se justifica pela maior representatividade destes elementos no custo total do transporte de carga e pela facilidade em manipular seus dados. Isto posto, tem-se os subsídios para a apresentação do método proposto nessa pesquisa.

O Capítulo 5, seguinte, discorre sobre as etapas e sub-etapas necessárias para a sua adoção.

5 MÉTODO: IDENTIFICAÇÃO DOS EFEITOS DA CONFIABILIDADE, VULNERABILIDADE E RISCO NA ESCOLHA DA ROTA

No Capítulo 5, o método para representação dos custos da escolha de rota baseado na confiabilidade, vulnerabilidade e risco dos arcos é descrito. O objetivo do método é investigar a redução de custos, ou melhoria na qualidade da entrega, ao se analisarem os três atributos previamente no processo de modelagem da rota.

A abordagem metodológica proposta nesta pesquisa possui alicerce no conteúdo descrito em Jenelius *et al.* (2006). Nesta circunstância, assume-se que no modelo de vulnerabilidade da rede a demanda é inelástica, ou seja, considera-se que a falha no arco leva tempo suficiente para um novo equilíbrio de usuários se formar, contudo é curto o suficiente para não afetar a demanda de viagens de forma significativa.

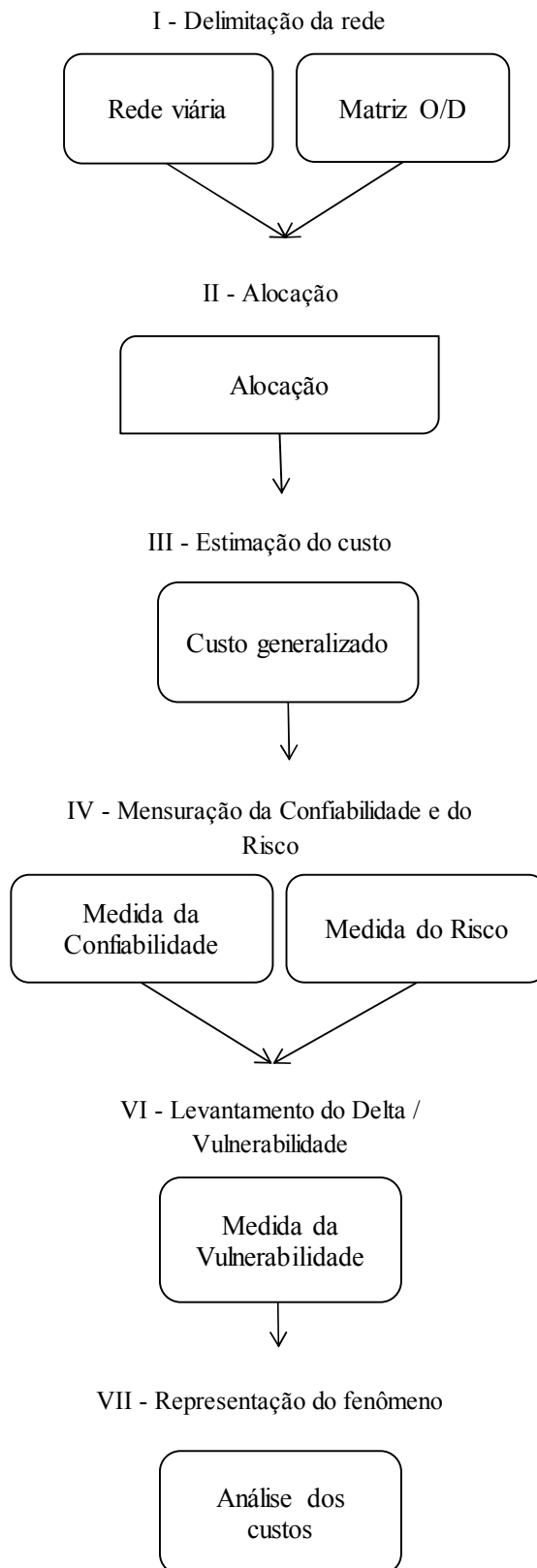
O experimento proposto no método precede de uma matriz origem-destino, cujos pares OD representem pontos de produção e de atração de veículos de carga no perímetro urbano escolhido. Consideram-se, também, as etapas de alocação das viagens para redes congestionadas (descritas no Capítulo 3) e as características particulares dos arcos desta rede. Nesse contexto, conjectura-se o cenário de custos da rede de transporte pré-incidente.

Ao carregar a rede, obtém-se o cenário *quo* de custos (monetários e não monetários), bem como os atributos de volume e velocidade. Estes atributos são alicerces para a obtenção do risco (por meio de modelo de previsão de acidentes). Destarte, a confiabilidade é obtida por via da análise da variabilidade dos tempos de viagens dos arcos, através de coleta de dados.

Subsequente à delimitação do cenário pré-incidente da rede, este deve confrontar-se com o cenário pós-incidente. Nesta etapa, a seleção dos arcos a ser interrompidos será feita de acordo com o grau de risco de ruptura do arco e, em outro cenário, de acordo com o índice de confiabilidade do arco. O acréscimo de custos resultante da confrontação, ou delta de desempenho, é o atributo da vulnerabilidade do sistema.

O método de sete etapas para análise da escolha de rotas considerando os três atributos é ilustrado no fluxo presente na Figura 15.

Figura 15 – Etapas metodológicas para mensuração dos custos da vulnerabilidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos itens seguintes, as etapas metodológicas do modelo de planejamento de rotas para o transporte de carga serão detalhadamente descritas e dispostas de forma lógica. Concomitantemente, quando necessário, serão feitas referências aos tópicos expostos na revisão do estado da arte.

5.1 Delimitação da rede

Nesta etapa, delimita-se a rede viária a ser estudada, com foco em área urbana adensada com movimentação de cargas. Devido as cidades de médio e grande portes, em geral, adotarem zonas de restrição de circulação (ZRC) para o transporte de cargas, este experimento, preferencialmente, considerará a situação de distribuição de mercadorias em uma área com tais características, pois tal situação representa dificuldades adicionais para o transportador, pois existem horários e veículos específicos para circulação em tal área, fazendo com que a roteirização ganhe ainda mais importância. Nesta etapa metodológica serão definidos e selecionados os dados de entrada do problema.

5.1.1 Zona com restrição de circulação (ZRC)

No caso de Fortaleza – CE, conforme a Portaria AMC Nº 218 DE 05/11/2012, autoridade de trânsito do Município de Fortaleza, no Art. 2º, instrui-se que a zona com restrição de circulação (ZRC) são os corredores e áreas devidamente identificados por meio de sinalização de regulamentação, nos quais a circulação de veículos de carga com dimensões e Peso Bruto Total (PBT) acima dos estabelecidos (Figura 16), é proibida de 0 às 10h e de 16 às 24h de segunda a sexta-feira e aos sábados e domingos.

Figura 16 – Zona com restrição de circulação de veículos de carga em Fortaleza



Fonte: AMC (2012).

Portanto, rede a ser escolhida para realização do experimento representará um conjunto de nós e arcos que estejam inseridos na ZRC do município de Fortaleza. Em outras palavras, deverá representar um contexto de transporte urbano denso, abrangendo:

- a) indústrias localizadas na região metropolitana;
- b) combinação de arcos de alta e baixa capacidade;
- c) concentração de atividades comerciais na região central.

Isto posto, determina-se a sua abrangência física, bem como os atributos dos arcos que servirão de base para as análises. Como forma de simplificação do modelo, considerar-se-á somente os componentes expostos na Tabela 2, de forma que o experimento não perca a fidedignidade com o fenômeno.

Tabela 2 – Lista de componentes da rede de transportes

	<i>Componentes</i>
I	Quantidade de arcos e nós
II	Comprimento do arco (metros)
III	Velocidade média (km/h) em condições de trânsito livre
IV	Capacidade dos arcos (veículos/hora)
V	Tempo para percorrer cada arco (segundos)

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2 Matriz OD de carga

Após escolha e modelagem da rede de transportes, a próxima etapa metodológica é estimar a matriz de origem-destino (OD) para veículos urbanos de carga (VUC) que será alocada à rede viária para cada cenário de rede íntegra e de rede comprometida. A Matriz OD representa o número de veículos VUC's que circulam entre as zonas de origem e destino de uma rede viária. Entende-se como VUC, o caminhão com dimensões e peso bruto total máximos (PBT) estabelecidos conforme Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Especificações do veículo urbano de carga (VUC)

<i>Pesos e Medidas</i>	<i>Valores</i>
Largura máxima	2,20m
Comprimento total máximo	7,30m
Altura total	4,40m
Peso bruto total máximo (PBT)	10 toneladas

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Matriz OD de carga será considerada como dado de entrada, o processo de obtenção poderá ser feito via pesquisa de campo com a modelagem associada, podendo ser feita a partir de dados indiretos, como volume de tráfego, processo tido como modelagem da Matriz OD sintética, ou por meio de entrevistas que visam correlacionar a geração de viagens com dados socioeconômicos. Há ainda uma terceira via, adotada no presente trabalho tendo em vista que o foco não consiste na representação da Matriz OD e que não há para o município de Fortaleza uma Matriz OD disponível, que será adotar uma matriz de viagens com base na densidade comercial da área escolhida, ou seja, houve nesta pesquisa uma criação/suposição, ou, o estabelecimento de uma Matriz OD hipotética.

5.2 Alocação da Matriz OD à rede de transportes

Conforme a execução dos estágios: (i) delimitação da rede de transporte e (ii) estimação da matriz origem-destino, a próxima etapa consiste em alocar o fluxo de veículos à rede de transporte. Pondera-se que a rede já estará previamente carregada por veículos leves, através de contagem de tráfego a ser detalhada no Item 6.1.1.1. Portanto, a presente etapa de alocação é somente para os veículos urbanos de carga inseridos na Matriz OD.

5.2.1 Caminho mínimo

A distribuição dos fluxos entre os pares OD da rede será determinada pelo software TransCAD, versão 4.5. Trata-se de um sistema de informações geográficas aplicado ao transporte (SIG-T), cujo algoritmo de escolha de rota segue o modelo de Dijkstra (1959).

Nesse contexto, deve-se desenhar a rede no sistema, inserir as impedâncias dos nós e arcos e escolher os três caminhos mínimos de fluxo livre, considerando cada par origem-destino.

5.2.2 Equilíbrio do usuário

Uma vez determinada a Matriz OD e os caminhos mínimos entre os pares, deve-se alocar os fluxos aos caminhos mínimos da rede.

Para isso, adota-se o modelo de equilíbrio determinístico do usuário proposto inicialmente por WARDROP (1952, *apud* DAVIS, 1993). No modelo de equilíbrio determinístico os fluxos dos arcos f e os seus correspondentes custos c são obtidos ao aplicar simultaneamente o Modelo de Oferta e Modelo de Demanda expostos por Cascetta, (2009). A Função Objetivo busca minimizar o tempo total (C) da rede de transportes de forma em que esteja em equilíbrio, conforme Equação 15.

$$F = \min = \sum_i \int_0^{f_i} c_i(y_i) dy_i \quad s.a \quad (14)$$

$$f \in Sf$$

Em que

c_i : custo do arco i ;

f_i : fluxo no arco i ;

y : constante calibrada.

No caso de um sistema de transporte, nota-se que o equilíbrio ocorre em diversos níveis. O mais simples é o equilíbrio na rede viária, onde os viajantes de uma matriz origem-destino buscam rotas para minimizar as despesas de viagem (tempo). Isso resulta em sua tentativa de rotas alternativas, explorando novas até se estabelecer em um padrão relativamente estável após muitas tentativas e erros.

Essa alocação de viagens às rotas produz um padrão de fluxos que podem ser considerados equilibrados quando os viajantes não conseguem encontrar melhores rotas para os seus destinos. Eles já estão viajando sobre as melhores rotas disponíveis (ORTUZAR & WILLUMSEN, 2011).

5.3 Estimação do custo generalizado

Na modelagem proposta, assume-se que um evento ocasiona falha em um ou mais arcos da rede de transportes. Tal evento ocasiona interrupção total do arco, o que obriga a todos os viajantes deste arco a tomar outras rotas menos vantajosas. Assume-se, do mesmo modo, que os usuários da rede de transportes se comportam consoante o método de equilíbrio determinístico do usuário.

Diante disso, o custo de viagem entre cada par origem-destino (OD) pós-alocação é definido de forma única. A formulação é definida na Equação 16, função desenvolvida pelo *Bureau of Public Roads* (BPR), tratada na NCHRP 365 (TRB, 1988).

$$t_i = t_{0,i} \left(1 + a_i \frac{f_i}{cap_i} \right)^y \quad (15)$$

Em que

t_i : custo do arco i ;

$t_{0,i}$: custo inicial do arco i ;

f_i : fluxo no arco i ;

cap_i : capacidade do arco i ;

y : constante de calibração;

a_i : constante de calibração.

O custo monetário, por sua vez, deve-se constituir de elementos variáveis, ou seja, que oscilam com a quilometragem percorrida (ex. combustível, lubrificante e pneus). Desta forma, a medição das impediências será realizada de maneira direta.

5.4 Mensuração da confiabilidade

Ao inserir o volume de tráfego da rede de transportes, bem como o custo monetário e não monetário das rotas que compõem os pares origem-destino, tem-se subsídios para estimar a confiabilidade da rede e das rotas possíveis de serem tomadas entre os pares origem-destino.

A mensuração é dividida em duas sub-etapas: (i) equipamento e material; (ii) coleta.

5.4.1 Equipamento e material

Conforme o Tópico 4.8.3 utilizar-se-á a variabilidade do tempo de viagem como forma de estimar a confiabilidade das rotas. Desta forma, realiza-se uma coleta de amostras utilizando o método das placas, descrito no Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006). Esse método, “consiste na anotação, na entrada e saída do trecho analisado, da placa e hora de passagem dos veículos.” (2006, p.160), onde as placas são comparadas e o tempo/velocidade aferidos. Os meios de obtenção dos dados podem ser manuais (observação) ou eletrônicos (radares e câmeras).

Para os trechos que não dispõem de radares eletrônicos, utilizar-se-á o método do observador móvel. “Esse método é usado para obtenção do número de veículos, não em um ponto da via, mas sim num determinado trecho da mesma. Serve ainda, para determinar tempos e velocidades de percurso médias, tendo sua maior utilização em vias urbanas” (2006, p. 164).

Logo, requer um veículo-teste e ferramentas para efetuar contagens de tráfego, medir distâncias e tempos de viagem. Um motorista, um observador/anotador, um cronômetro (graduado em centésimos de minuto ou em segundos), contadores manuais e formulários para anotação de dados são necessários.

5.4.2 Coleta

De forma preliminar, selecionam-se os pontos de início e fim do trecho. O grupo de trabalho pode escolher e medir a extensão do trecho de teste em mapas ou medir a extensão com uso do hodômetro.

O veículo-teste sai de um ponto um pouco antes do início do trecho. O motorista deverá conduzi-lo à velocidade média do trecho. O observador zera o cronômetro e inicia o preenchimento dos dados. Esse procedimento é repetido n vezes até que possa aferir a variância e o desvio padrão amostral de cada trecho.

5.4.3 Dados

Ao final da coleta, tem-se a série de dados amostrais e os indicadores de variabilidade do tempo de viagem da rede. Cria-se, então, uma gradação, considerando a confiabilidade como: alta, média e baixa.

Para analisar a confiabilidade da rota, necessita-se encontrar a variância das somas das variáveis independentes. Segundo Triola (2005) a variância da soma de duas variáveis aleatórias independentes é igual à soma de suas variâncias. Ou seja:

$$Var (X \pm Y) = Var (X) + Var (Y)$$

Com isso, a variabilidade da rota é tratada como a soma das variâncias dos arcos que a compõem, sendo possível realizar a comparação de seus tempos.

5.5 Mensuração do risco

Nesta etapa, insere-se o atributo de risco ao modelo matemático da vulnerabilidade da rede de transportes. Para, isso, necessita-se classificar os distúrbios a ser considerados e escolher a ferramenta de estimação do risco.

5.5.1 Classificação dos distúrbios

Ao considerar um cenário urbano, verifica-se que os distúrbios que limitam a movimentação de mercadorias são normalmente associados a colisões graves que impedem o fluxo no arco atingido.

Conforme discutido no Tópico 4.6 do Capítulo 4, considerar-se-á no cálculo do risco e da vulnerabilidade o conceito de Distúrbios Recorrentes abordado por Snelder *et al.* (2012). No caso, acidentes de trânsito.

Desta forma, optou-se por utilizar modelos de previsão de acidentes em trechos (MPA) que identifiquem o risco de um arco vir a sofrer um acidente que o interrompa, ou reduza significativamente, o fluxo de veículos durante sua ocorrência.

5.5.2 Escolha das variáveis explicativas

A literatura indica dados de exposição e risco apontados como significativos em análises de modelos. O processo de escolha das variáveis para os modelos de previsão de acidentes não possui critérios objetivos e, predominantemente, depende, além dos objetivos do estudo, de fatores relacionados à experiência do modelador e à acessibilidade das informações acerca do ambiente viário (CUNTO *et al.*, 2012).

Por conseguinte, adotar-se-á algumas variáveis adaptadas do estudo de Cardoso e Goldner (2007) de forma a simplificar os cálculos do modelo. As variáveis significativas são exibidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis significativas utilizadas no modelo de previsão de acidentes

<i>Variável</i>	<i>Descrição</i>
Vol_Veic.	Volume médio diário de veículos
Vel_Méd.	Velocidade média no trecho

Fonte: Cardoso e Goldner (2007).

5.5.3 Previsão do risco

Uma vez determinadas as variáveis significativas, o próximo passo é codificar as variáveis para uma mesma base numérica. Conforme Equação 17 de Cardoso e Goldner (2007) abaixo:

$$V_{cod} = \frac{V_{obs} - A}{B - A} \quad (16)$$

Onde

V_{cod} : valor codificado da variável (intervalo de 0 a 1);

V_{obs} : valor observado para a variável;

A : menor valor observado da amostra;

B : maior valor observado da amostra.

Os fatores de risco e exposição (variáveis significativas) são, por fim, aglutinados em um modelo de previsão representado pela Equação 18.

$$VR = e^{B_0 + B_1 \times X_1 + B_2 \times X_2 + \dots} \quad (17)$$

Em que

VR : variável resposta;

B_0 : constante;

B_i : parâmetros do modelo;

X_i : variáveis explicativas (fatores de risco e exposição analisados).

Tal formulação é necessária para atribuir uma gradação de risco (alto, médio e baixo) para cada arco da rede de transportes, levando em consideração múltiplos fatores de exposição.

5.6 Elaboração dos cenários de avaliação

Nesta etapa metodológica os arcos da rede de transportes a ser “rompidos” são selecionados. Os critérios de escolha considerados são o risco e a confiabilidade de cada trecho.

Conforme conclusão da Seção 5.5, serão rompidos os arcos que apresentarem valores definidos como “altos” (risco) e “baixos” (confiabilidade). Para cada cenário, três experimentos de ruptura serão simulados e os resultados analisados.

A alocação segue o mesmo procedimento exposto no Item 5.2, no qual o modelo de equilíbrio de Wardrop determina a escolha de rota dos caminhões para o contexto de pós incidente. Com isso, um novo custo generalizado é obtido para cada cenário.

5.7 Avaliação do desempenho (Delta)

O custo oriundo da interrupção de um arco, portanto, segue a formulação adotada por Jenelius *et al.* (2006), conforme discutido no Item 3.2.3. Deste modo, confrontam-se os custos dos arcos com falha do elemento e , $c1^{(e)}$ e o custo inicial, sem falha, $co, 1$, obtendo-se o delta de desempenho.

5.8 Mensuração da vulnerabilidade

Mensurar o atributo da vulnerabilidade equivale à aplicação da Seção 5.3, ou seja, ao estimar o custo generalizado de cada arco no cenário pré-incidente se pode determinar o valor da vulnerabilidade de cada rota que liga os pares origem-destino ao romper os arcos, utilizando os critérios de cortes pré-estabelecidos.

O custo irá variar conforme o tempo de viagem e a quilometragem percorrida em cada cenário. No caso do transportador, o objeto de estudo é o veículo urbano de carga (VUC). Então, coleta-se o valor médio do Diesel, bem como o rendimento médio em quilometro por litro (km/l) para avaliar os efeitos da vulnerabilidade dos arcos falhos.

5.9 Análise dos resultados

Com a rede em equilíbrio e estabelecidos os atributos de desempenho da vulnerabilidade, da confiabilidade e do risco, analisa-se o comportamento do custo generalizado. Nesse tocante, os fatores a ser analisados são:

- a) custo generalizado da rota, mediante algoritmo de caminho mínimo gerado pelo algoritmo de Dijkstra e implementado no TransCAD 4.5;
- b) custo generalizado da rota, mediante escolha de caminho de risco baixo;
- c) custo generalizado da rota, mediante escolha de caminho de confiabilidade baixa;
- d) vulnerabilidade dos arcos escolhidos.

Nesse tocante, objetiva-se identificar os custos para cada cenário de forma a compreender como os três atributos analisados simultaneamente podem contribuir para a redução do custo total.

5.10 Considerações do capítulo

O ponto central da análise se baseia no desdobramento pós-incidentes, onde se realizaram medições na variação do tempo total e custo generalizado dos fluxos entre pares origem-destino. A medição das variações do índice de vulnerabilidade (Δ) fornecerá subsídios para a análise da inserção do risco e da confiabilidade em modelos de escolha de rota.

Também, busca-se identificar um atributo direcionador dos arcos vulneráveis, ou seja, prover um método para medir os arcos mais vulneráveis sem a necessidade de romper sucessivamente todos os arcos do sistema viário.

No Capítulo 6 realizar-se-á o experimento em uma rede real, simulando um ambiente cotidiano do transporte de carga em uma cidade de grande porte. A análise do risco das rotas se baseará no corte dos arcos de maior probabilidade de falha. No caso da confiabilidade, a análise será baseada na variabilidade do tempo de entrega da mercadoria, implicando em queda no desempenho da transportadora.

6 EXPERIMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados do experimento de medição dos impactos que os atributos de confiabilidade, vulnerabilidade e risco exercem no transporte de carga em meio urbano. Nessa conjectura, o experimento será apresentado conforme as etapas descritas abaixo:

- a) apresentação rede viária, variáveis e impedâncias;
- b) especificação dos cenários do experimento;
- c) simulação;
- d) resultados da aplicação do modelo.

Pretende-se compreender os atributos de confiabilidade e risco como elementos direcionadores da vulnerabilidade da rede, bem como entender como tais atributos influem na representação do custo e decisão de escolha da rota para o transportador.

6.1 Rede viária

O experimento foi realizado em parte da rede viária cidade de Fortaleza – CE, especificamente na região que abrange o bairro da Aldeota, área adensada e que concentra grande quantidade de comércio e serviços, ou seja, há movimentação de carga urbana e presença constante de congestionamentos. Ademais, tal área está inserida na ZRC do município. A Figura 17 ilustra a área a ser simulada, no contexto da rede viária urbana.

Figura 17 – Rede de viária de Fortaleza (TransCAD 4.5), com destaque para a região do experimento



Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerou-se nesta pesquisa um recorte da rede viária para realizar o experimento de corte nos arcos da rede de forma a obter maior controle sobre as variáveis de entrada do modelo. O recorte da rede viária urbana, ilustrado na Figura 18, é composto por 47 nós, conectados entre si por 74 arcos orientados (vide Tabela 5).

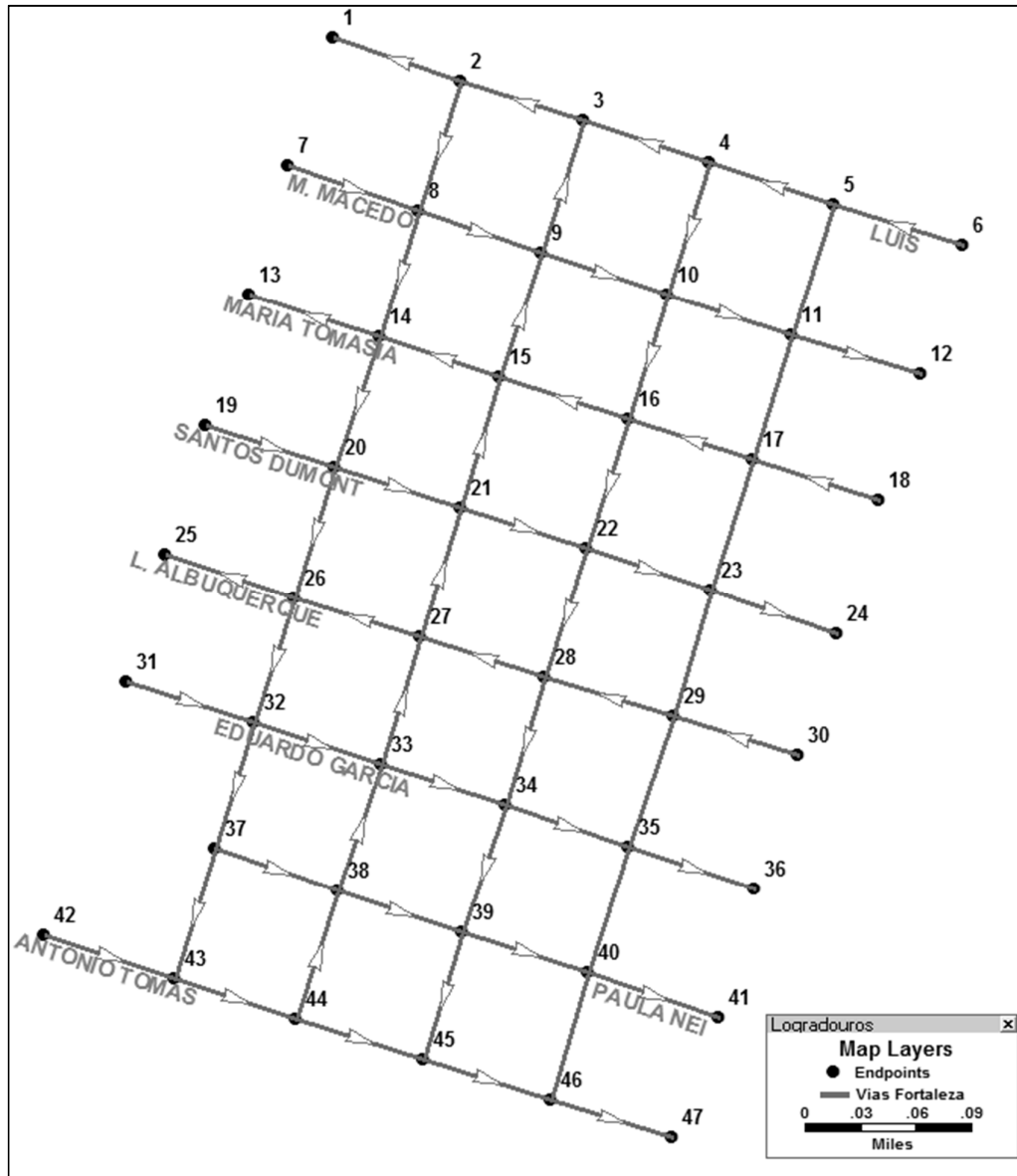
Tabela 5 – Instalações de transportes e serviços

<i>Instalações de transportes e serviços</i>	<i>Quantidade</i>
Nós	47
Arcos	74

Fonte: Elaborada pelo autor.

A quantidade de nós e arcos é suficientemente grande para que possa oferecer a possibilidade de ao menos 3 rotas alternativas ao Transportador entre cada ponto origem-destino.

Figura 18 – Corte da rede viária urbana



Fonte: Elaborada pelo autor.

Do mesmo modo, o recorte da rede viária é suficientemente pequeno a ponto de simplificar o trabalho de modelagem e de cortes nos arcos. Uma vez que para cada cenário de corte, novas rotas serão adotadas e, com isso, novo custo generalizado. Desta maneira, pode-se

afirmar que a rede selecionada atende às expectativas do trabalho, pois possibilitará a verificação da proposta metodológica.

6.1.1 Atributos dos arcos

As informações de capacidade das vias são ilustradas na Tabela 6. Para cada faixa de tráfego, adotou-se 1.250 veículos por hora (vph) como capacidade, conforme estudo realizado em vias urbanas semaforizadas apresentado por Colella *et al.* (2004).

Tabela 6 – Capacidades dos arcos da rede

<i>Tipo de vias</i>	<i>Capacidade (vph)</i>
Arteriais	3.750
Coletoras	2.500
Locais	1.250

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados estratificados, por trecho, são expostos na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Atributos dos trechos

<i>Logradouro</i>		<i>Capacidade por arco (vph)</i>	<i>Qtd. Arcos</i>	<i>Comprimento por arco (m)</i>	<i>V. Máxima (km/h)</i>	<i>T. viagem por arco (seg)</i>
Rua	Barbosa de Freitas	2.500	7	113	40	10,17
Rua	Leonardo Mota	2.500	7	113	40	10,17
Rua	Vicente Leite	2.500	7	113	40	10,17
Rua	Coronel Linhares	1.250	14*	113	40	10,17
Rua	Marcos Macedo	2.500	5	113	40	10,17
Rua	Maria Tomásia	2.500	5	113	40	10,17
Rua	Leonardo Albuquerque	2.500	5	113	40	10,17
Rua	Eduardo García	2.500	5	113	40	10,17
Rua	Paula Ney	2.500	4	113	40	10,17
Avenida	Santos Dumont	3.750	5	113	60	6,78
Avenida	Dom Luís	3.750	5	113	60	6,78
Avenida	Pe. Antônio Tomás	2.500	5	113	60	6,78

* 7 arcos no sentido norte + 7 arcos no sentido sul

Fonte: Elaborada pelo autor.

O comprimento por arco será padronizado em 113 metros, uma vez que a medida dos arcos dessa localidade oscila entre esse valor médio. Cada trecho possui entre quatro e cinco arcos, com velocidades máximas regulamentadas de 40km/h (coletoras) e 60 km/h (arteriais). Desse modo, o tempo de viagem para cada arco em fluxo livre (nenhum veículo alocado) é de 6,78 segundos para as arteriais e 10,17 segundos para as coletoras.

É evidente que ao carregar a rede o tempo de travessia sofrerá alterações. Tais alterações gerarão influências na decisão de qual rota tomar e como isso afetará o custo generalizado.

6.1.1.1 Contagem de tráfego

A alocação dos veículos de carga será realizada com a rede previamente carregada, de forma que a escolha de rota seja realizada com a rede em condições de congestionamento, conforme conceito de Wardrop (1952). Para isso, foi realizada uma contagem de tráfego dos arcos da rede e inserida no cálculo do tempo de travessia da equação de custo do arco, elaborada pelo do *Bureau of Public Roads* (vista no Item 5.3).

Os dados foram obtidos mediante contagem eletrônica da passagem de veículos nas interseções, a partir dos laços detectores do CTAFor. Foi feito o trabalho de manipulação e triagem das informações, considerando o horário de pico entre 08:00 e 09:00. O intuito é avaliar a escolha de rota no pior cenário possível, além de ser neste horário que se observa a maior quantidade de veículos de carga, pois é o principal momento para abastecimento dos comércios locais. Após o tratamento dos dados, o carregamento e o tempo de travessia se configuram conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Atributos consolidados da rede

<i>Rede</i>	<i>Fluxo livre</i>	<i>Carregada</i>	<i>%</i>
Comprimento (m)	8.362	8.362	100%
Velocidade média (km/h)	44	30	68%
Capacidade (vph)	180.000	236.441	131%
Tempo percurso total (seg)	702	1.153	164%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O comprimento total, trata-se do somatório dos comprimentos individuais dos arcos, é com base nesse componente que o tempo de percurso e a velocidade média são calculados.

O indicador de capacidade indica que a rede comporta, no intervalo de uma hora, 180 mil veículos. Entretanto, o carregamento coletado indica saturação, haja vista que aponta 236 mil veículos. Salienta-se que a condição de volume de tráfego superior à capacidade da via deverá ser analisada com cautela, uma vez que é esperado que o fluxo seja igual ou inferior à capacidade. Para fins de simulação, entende-se que a capacidade total da rede viária (180.000)

é oriunda de aproximação respaldada em trabalhos científicos. Apesar de não representar um dado oficial do município, considerou-se como uma aproximação válida.

O primeiro efeito do carregamento dos arcos é no tempo de percurso. O tempo total, quando considerado o fluxo, livre é de 702 segundos e ao carregar a rede com os veículos da contagem de tráfego, o tempo total passa para 1.153 segundos, um aumento de 164% no tempo de percurso dos arcos.

Outra consideração se baseia na redução da velocidade média dos veículos. Trata-se de um efeito complementar ao aumento do tempo de viagem, onde a velocidade média geral reduz de 43km/h (fluxo livre) para 30 km/h (carregada).

É nesse *status*, denominado *status quo*, que serão realizados os experimentos de alocação da Matriz OD de carga nos tópicos seguintes.

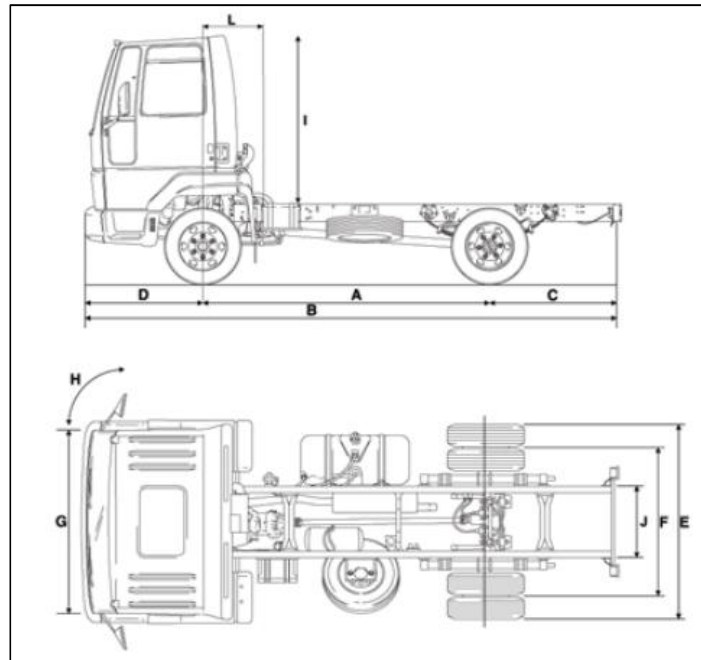
6.1.2 Elementos de suprimento

O sistema de transportes presente no experimento contém, conforme discutido por Cascetta (2009), elementos de oferta e de demanda. Em paralelo, existe um sistema de atividades cuja distribuição espacial das atividades econômicas impulsionam a demanda por modo de viagem. Salienta-se que no caso do experimento será abordado apenas o transporte de veículos e cargas.

6.1.2.1 Veículo urbano de carga (VUC)

O veículo considerado na simulação é o modelo Cargo 815 (Figura 19) da montadora Ford. Haja vista que possui chassi, entre-eixo, geometria de suspensão e direção projetados, seguindo a legislação sobre circulação de veículos de Fortaleza.

Figura 19 – Ford Cargo 815



Fonte: Ford.

Os atributos do veículo permitem a circulação para entregas na região densa da cidade, atendendo a norma de restrição para veículos de grande porte. A Tabela 9 destaca as características técnicas do veículo.

Tabela 9 – Características técnicas do veículo

<i>Característica</i>	<i>Dados</i>
Combustível	Diesel
Pneus	215/75R 17,5
Tara	3150/3170 Kg
A - Entre-eixo	3.300
B - Comprimento total	6.140
C - Balanço traseiro	1.570
D- Balanço dianteiro	1.267
E - Largura	2.109
F - Bitola traseira	1.670
G - Bitola dianteira	1.880
H - Diâmetro de giro do veículo	13
I - Altura da cabine	1.785
J - Largura externa do quadro do chassi	865
L - Mínima distância do eixo dianteiro à carroceria	665

* Em milímetros

Fonte: Ford.

Desta forma, coletou-se dados acerca do consumo de combustível e manutenção do veículo em ambiente urbano. Optou-se por utilizar somente dados de custos variáveis, não

incluindo custos fixos como: salário do motorista, taxas fixas e seguros; tampouco generalidades como: pedágios, dificuldades de entrega, paletes etc. Embora todos esses componentes do custo possam ser inclusos em simulações, depende somente do grau de informações que se pretende obter.

As informações foram obtidas através de uma empresa transportadora de grande porte com sede em Fortaleza e que presta serviços em outros centros urbanos. O período de análise de consumo do Diesel fora de 48 dias, entre a data de 01/01/2014 e 19/12/2014. Os dados de gastos com óleos diversos foram obtidos entre a data de 22/11/2014 e 19/12/2014, portanto de 27 dias. A coleta de dados dos componentes do custo foram realizadas através do sistema de *Enterprise Resource Planning* (ERP) da empresa. A Tabela 10 demonstra os resultados de consumo do caminhão.

Tabela 10 – Dados de consumo do veículo

<i>Custo</i>	<i>Valor (R\$/Km)</i>
Combustível	R\$ 0,47
Pneu	R\$ 0,06
Óleo (Motor, Lubrificante etc.)	R\$ 0,02
Rendimento	4,99 km/l

Fonte: Elaborada pelo autor.

A consideração no presente estudo, do custo com óleo, pneu e combustível se justifica devido à maior representatividade desses elementos na composição do custo total de transporte. Outro aspecto que vale ressaltar diz respeito à facilidade de rateio desses elementos de custo, onde o principal fator é o de quilômetros rodados. O custo generalizado, com isso, trata-se do somatório destes três componentes escolhidos.

Por conseguinte, tem-se os dados de custos variáveis do modelo de VUC C 815. Tais custos serão considerados na análise das rotas do transportador. A outra variável de análise é o tempo t , entretanto este depende do carregamento e da condição da rede, ou dos arcos que compõem a rota. Para isso, teve que ser delimitada a distribuição espacial da demanda, bem como a Matriz OD.

6.1.2.2 Distribuição espacial da demanda

A coleta de dados referente à distribuição espacial das atividades envolve a contagem de estabelecimentos comerciais ou industriais que justifiquem o abastecimento via

transporte rodoviário (Tabela 11). Nessa seção, desconsiderou-se a residência como fator de atração para o transporte de mercadorias.

Tabela 11 – Elementos de suprimentos

	<i>Logradouro</i>	<i>Shopping</i>	<i>Comércios</i>	<i>Indústrias</i>
Rua	Barbosa de Freitas	-	14	-
Rua	Leonardo Mota	-	13	-
Rua	Vicente Leite	-	18	-
Rua	Coronel Linhares	-	16	-
Rua	Marcos Macedo	-	10	-
Rua	Maria Tomásia	-	13	-
Rua	Leonardo Albuquerque	-	15	-
Rua	Eduardo García	-	12	-
Rua	Paula Ney	-	8	-
Avenida	Santos Dumont	2	35	-
Avenida	Dom Luís	1	32	1
Avenida	Pe. Antônio Tomás	-	22	1
	Total	3	208	2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados foram obtidos mediante contagem *in loco*. Como o propósito do experimento não era modelar a demanda por transporte de carga na região, entende-se que a contagem de comércios, shoppings e indústrias é um indicativo substancial de atratividade desse modo de transporte. Desta forma, a distribuição espacial dos pontos de oferta e demanda (apresentados na rede da Figura 20) obedecem ao descrito na Tabela 12

Tabela 12 – Pontos de origem e destino

<i>Origem-destino (nós)</i>
6--1
6--20
6--47
30--1
30--20
30--47
42--1
42--20
42--47

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os pontos de destino escolhidos (1, 20 e 47) se justificam por localizarem em pontos estratégicos de recebimento de cargas. Os pontos 1 e 20 representam três shopping centers situados em sua abrangência. O ponto 47 representa a saída do sistema em direção à outra região comercial da cidade.

Nesse tocante, a movimentação dos veículos urbanos de carga (VUC) entre os pares origem-destino é representada pela Matriz OD. A Matriz origem-destino evidenciada na Tabela 13, representa o desejo de possíveis deslocamentos entre os pares na rede de transportes utilizada.

Nesse experimento, ela foi desenvolvida mediante a contagem de estabelecimentos comerciais e industrias nos trechos da rede viária e teve seu volume inferido baseado na quantidade de estabelecimentos comerciais da região. Fora obtida por um método expedito, desenvolvido internamente para realização do trabalho e sem qualquer garantia, ou pretensão, que a mesma represente o real carregamento de VUC's na área em estudo. Embora reconheça-se que uma Matriz OD real traria maior contribuição ao método, achou-se que devido ao objetivo ser de verificar a aplicabilidade da proposta, os fluxos entre pares OD não seriam o principal elemento de análise a ser considerado.

Tabela 13 – Matriz origem-destino (OD)

<i>Origem/destino (nós)</i>	1	20	47	Σ
6	16	13	17	46
30	23	20	18	61
42	15	22	16	53
Σ	54	55	51	160

Fonte: Elaborada pelo autor.

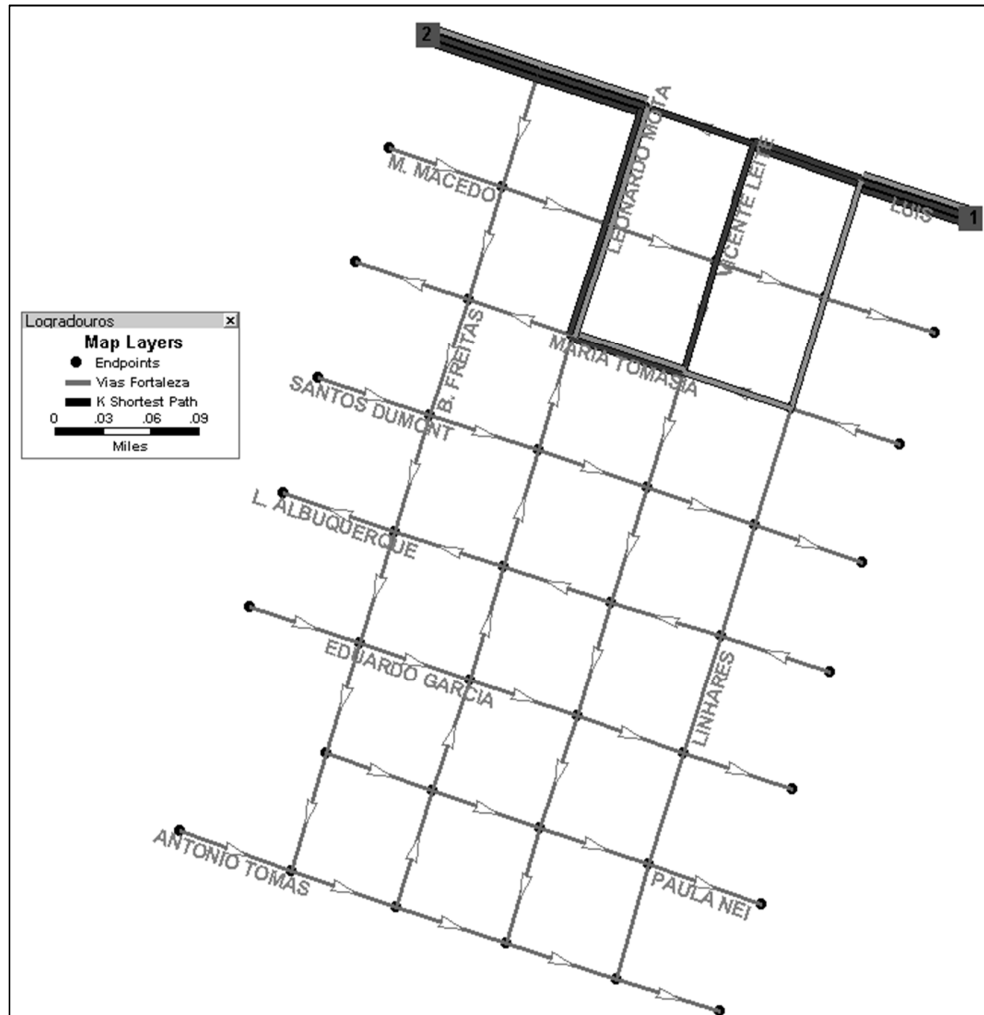
Para propósito de análise, o volume denota da razão de 2,16 veículos por arco no intervalo de uma hora de pico. Isto significa que em uma hora, 160 caminhões urbanos circularão entre os três pontos de origem e os três pontos de destino, obedecendo, cada motorista, a uma rota própria que minimize o seu custo perceptível.

Deste modo, trata-se de um volume conservador, considerando que se avalia a região propensa ao comercio do município. É pertinente que esse volume varie entre metrópoles, mas o importante é que represente um número condizente com o fenômeno e que possa ser suficientemente elevado a ponto de interferir no tempo de viagem de todos os usuários do sistema.

A distribuição dos fluxos entre os pares OD da rede foi determinada pelo software TransCAD, versão 4.5. Escolheu-se os três caminhos mínimos (*shortest path*, $k = 3$) para cada par origem-destino, salienta-se que o software utiliza o algoritmo de Dijkstra (1959). Em outras palavras, neste experimento o motorista pode escolher entre três rotas distintas, aquela que minimiza seu custo individual.

Considerou-se essa quantidade como suficientemente grande para representar as opções de caminhos para o motorista, sem necessitar de um tempo para processamento computacional elevado. A Figura 21 mostra as três rotas mínimas encontradas pelo TransCAD para os pontos 6 e 1. As demais rotas obtidas pelo software podem ser visualizadas no Apêndice desta pesquisa.

Figura 21 – Caminhos mínimos obtidos no TransCAD 4.5 para o par 6-1 ($k=3$)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Explica-se tal procedimento, conforme entendimento de que inicialmente o motorista “enxerga” a rota através do método tudo-ou-nada (caminho mínimo em fluxo livre) e, após experimentar o carregamento da rede, ele altera sua percepção de custo, com isso, sua rota. Este último comportamento, seguindo o modelo de Equilíbrio do Usuário.

Diante disso, fez-se o procedimento para todos os pares OD do experimento. Obtém-se, então, um conjunto de 3 rotas disponíveis para cada par OD como escolha para os motoristas.

A próxima etapa foi alocar os 160 veículos da Matriz OD na rede de transportes, através do modelo de Equilíbrio Determinístico do usuário proposto por Wardrop (1952). Nessa conjectura, conforme abordado no Capítulo 3, o modelo de equilíbrio seguiu as seguintes diretrizes:

- a) os tempos de viagem modelados devem ser realistas o suficiente;
- b) a função deve ser não-decrescente;
- c) a função não deve gerar um tempo de viagem infinito;
- d) o usuário não consegue alterar o seu custo mínimo ao alterar a sua rota individualmente;
- e) o tempo médio global de viagem do sistema é mínimo.

Por conseguinte, o efeito da alocação dos 160 caminhões na rede originaram os tempos de trajeto das rotas exibidos na Tabela 14. Observa-se que as rotas a, por representarem sempre o caminho de menor distância, tendem à ter tempos menores do que as rotas b e c.

Tabela 14 – Tempo de percurso das rotas no modelo de equilíbrio (segundos)

<i>O/D</i>	<i>Rota a</i>	<i>Rota b</i>	<i>Rota c</i>	<i>TOTAL</i>
6--01	48,65	116,51	114,96	280,11
6--20	104,28	101,06	99,51	304,84
6--47	118,59	156,60	140,72	415,91
30--01	110,66	129,15	166,07	405,88
30--20	113,70	144,88	166,29	424,86
30--47	84,97	126,67	166,42	378,06
42--01	230,65	224,34	244,90	699,89
42--20	215,20	227,38	247,94	690,53
42--47	126,92	163,07	156,16	446,15
			Total	4.046,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

O custo generalizado (combustível, pneu e óleos), no *status quo* é dado na Tabela 15. Este custo considera distância total (km) percorrida por cada rota entre os pares OD. No caso do combustível a quantidade de litros de Diesel consumida foi mensurada de acordo com o rendimento médio coletado (4,99 km/l), tendo o seu valor convertido pela cotação do período.

Tabela 15 – Custo generalizado do *status quo* por rota (i) agregado; (ii) desagregado

<i>Vij</i>	<i>Rota a</i>	<i>Rota b</i>	<i>Rota c</i>	<i>Total</i>
06--01	R\$ 16,18	R\$ 20,64	R\$ 16,03	R\$ 52,86
06--20	R\$ 21,29	R\$ 17,84	R\$ 10,86	R\$ 49,99
06--47	R\$ 9,15	R\$ 19,37	R\$ 15,75	R\$ 44,27
30--01	R\$ 23,42	R\$ 19,84	R\$ 24,24	R\$ 67,50
30--20	R\$ 16,67	R\$ 16,67	R\$ 26,17	R\$ 59,51
30--47	R\$ 10,07	R\$ 13,52	R\$ 16,95	R\$ 40,55
42--01	R\$ 32,03	R\$ 26,96	R\$ 32,98	R\$ 91,96
42--20	R\$ 30,30	R\$ 24,00	R\$ 30,02	R\$ 84,33
42--47	R\$ 12,91	R\$ 15,30	R\$ 13,29	R\$ 41,50
□	R\$ 172,02	R\$ 174,14	R\$ 186,29	R\$ 532,45

(i)

<i>Vij</i>	<i>Rota a</i>	<i>Rota b</i>	<i>Rota c</i>	<i>Total</i>
06--01	R\$ 0,31	R\$ 0,56	R\$ 0,56	R\$ 1,44
06--20	R\$ 0,50	R\$ 0,50	R\$ 0,44	R\$ 1,44
06--47	R\$ 0,56	R\$ 0,69	R\$ 0,69	R\$ 1,94
30--01	R\$ 0,56	R\$ 0,56	R\$ 0,82	R\$ 1,94
30--20	R\$ 0,75	R\$ 0,44	R\$ 0,50	R\$ 1,69
30--47	R\$ 0,31	R\$ 0,44	R\$ 0,69	R\$ 1,44
42--01	R\$ 0,69	R\$ 0,94	R\$ 0,94	R\$ 2,57
42--20	R\$ 0,63	R\$ 0,88	R\$ 0,88	R\$ 2,38
42--47	R\$ 0,31	R\$ 0,44	R\$ 0,44	R\$ 1,19
□	R\$ 4,64	R\$ 5,45	R\$ 5,96	R\$ 16,05

(ii)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A primeira relação indica o custo agregado por rota, entre os respectivos pares OD, para os trajetos a, b e c. Isto demonstra que para todos os veículos que trafegam entre os pontos 06 e 01, o custo somado é de R\$ 16,18. A relação seguinte mostra o custo por VUC, onde cada rota entre um par OD tem o seu custo individualizado. Desta maneira, para o mesmo veículo que deseja trafegar entre o par (06, 01) terá como custo R\$ 0,31.

É evidente que a visão agregada do custo monetário é interessante, à primeira vista, para o Analista de Tráfego que deseja racionalizar o custo dos *links* da rede viária, ou seja, desenvolver rotas que minimizem o custo total da rede para os usuários. No caso do transportador, que busca minimizar a operação do seu veículo, não é conveniente mensurar o custo agregado. Com isso, a segunda relação é mais indicada para compreender os cenários de corte apresentados no Item 6.2, seguinte.

6.2 Cenários

Para efeito da vulnerabilidade da rede de transportes, considerar-se-á como falha uma redução drástica na capacidade do arco (BERDICA, 2002). Isto posto, os arcos escolhidos

para falhar terão sua capacidade restrita a 1 veículo por hora (vph) no instante da alocação, pois trata-se de um valor realista o suficiente para representar um cenário de interrupção no arco.

Uma vez definida a rede de transportes e as restrições do modelo, escolheu-se cinco cenários de restrições no fluxo de arcos para a realização dos testes experimentais. Os cenários buscam representar as seguintes situações:

- a) rede sem falhas (*status quo*);
- b) falha em um arco de alto risco (duas replicações simuladas);
- c) falha em um arco de baixo risco (duas replicações simuladas);
- d) falha em um arco de confiabilidade alta (duas replicações simuladas);
- e) falha em um arco de confiabilidade baixa (duas replicações simuladas).

As escolhas por cenários opostos, tanto para risco (alto e baixo) como para confiabilidade (alta e baixa), advém do propósito de validação e enriquecimento da análise dos resultados.

No caso dos cenários que envolvem a confiabilidade, além de identificar o custo generalizado da obstrução de um arco se fez a análise dos tempos de entrega, ou seja, o quão a rota é confiável sob o ponto de vista do tempo.

Para rodar a simulação, fora necessária à coleta e manipulação os atributos que serviriam de direcionadores para os cortes nos arcos, de forma que os arcos não fossem cortados aleatoriamente. O intuito é simular os cenários que exijam a classificação prévia do risco (através de modelos de previsão de acidentes) e da confiabilidade (através da variância do tempo de viagem) de cada arco.

Diante disso, as Seções 6.2.1 e 6.2.2 expõem os dados referentes à variância do tempo t e a modelagem do risco, cujas etapas metodológicas estão descritas nos Itens 5.4 e 5.5, respectivamente, no Capítulo 5.

6.2.1 Classificação dos arcos (confiabilidade)

As avenidas Dom Luís (arcos 1 ao 5) e Santos Dumont (arcos 31 ao 35) são monitoradas por radar eletrônico cujos dados foram obtidos pelo Controle de Tráfego em Área de Fortaleza, CTAFOR. Essa característica simplificou a coleta dos dados de tempo de viagem para os arcos desses dois trechos, através do método das placas. Na Figura 22, se tem à disposição dos radares em ambos os trechos.

Figura 22 – Localização dos radares



Fonte: CTAFOR.

Os círculos presentes nas avenidas Dom Luís e Santos Dumont mostram a posição geográfica dos radares, assim como o direcionamento das câmeras. A data escolhida fora o dia 08/10/2014 entre o horário de 08:00 à 09:00, onde se obteve um n de 28 observações para a Dom Luís e n de 27 observações para a Santos Dumont. Isso significa que o sistema eletrônico de radar captou a entrada de 28 placas no ponto 1 e a saída das mesmas 28 placas no ponto 2, identificando os horários da entrada e saída e a velocidade. Os dados obtidos se referem ao tempo médio (em minutos), a variância e o desvio padrão, conforme expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Medição da variabilidade do tempo na Dom Luís e Santos Dumont

<i>Trecho</i>	<i>Arcos</i>	<i>Tempo médio (min)</i>	<i>Variância</i>	<i>Desvio Padrão</i>
Av. Dom Luís	1 ao 5	3,49	0,30	0,54
Av. Santos Dumont	31 ao 35	1,29	0,50	0,70

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os trechos que não dispõem de radares eletrônicos, utilizou-se o método do observador móvel. Para tanto, foi empregado 1 veículo-teste, 1 cronometro e 1 formulário para anotações. A única variável medida foi o tempo de percurso de cada trecho (em minutos). Ademais, constam no formulário as informações de: data, logradouro, início do trecho, fim do trecho, condições do tempo, quantidade de shoppings, indústrias e lojas.

Os pontos de início e fim de cada via foram sempre o primeiro nó que compõe o trecho e o último, considerando o recorte da rede de Fortaleza explicitado no Tópico 6.1. O veículo-teste saiu de um ponto um pouco antes do início do trecho, conduzido à velocidade média do segmento. A quantidade de observações seguiu $n = 12$.

Por conseguinte, os dados de saída seguem conforme a Tabela 17.

Tabela 17 – Medição da variabilidade do tempo de todos os trechos (em minutos)

<i>Trecho</i>	<i>Arcos</i>	<i>Variância de cada arco</i>	<i>Desvio Padrão de cada arco</i>
Rua Barbosa de Freitas	6;16;26;36;46;56;65	0,02	0,14
Rua Leonardo Mota	7;17;27;37;47;57;66	0,25	0,50
Rua Vicente Leite	8;18;28;38;48;58;67	0,21	0,45
Rua Coronel Linhares	9;10;19;20;29;30;39;40;49;50;59;60;68;69	0,49	0,70
Rua Marcos Macedo	11;12;13;14;15	0,12	0,35
Rua Maria Tomásia	21;22;23;24;25	0,81	0,90
Rua Leonardo Albuquerque	41;42;43;44;45	0,42	0,65
Rua Eduardo García	51;52;53;54;55	0,04	0,20
Rua Paula Ney	61;62;63;64	0,15	0,39
Avenida Santos Dumont	31;32;33;34;35	0,50	0,70
Avenida Dom Luís	1;2;3;4;5	0,30	0,54
Avenida Pe. Antônio Tomás	70;71;72;73;74	0,98	0,99

Fonte: Elaborada pelo autor

Neste trabalho, assumiu-se que a variabilidade dos arcos é a mesma variabilidade do segmento, logo todos os arcos que compõem o segmento possuem a mesma medida de confiabilidade. No experimento, o trecho de maior variabilidade do tempo é a Av. Padre Antônio Tomás (0,98 min²), portanto menos confiável, e o de menor variabilidade (mais confiável) é a Rua Barbosa de Freitas (0,02 min²).

Entende-se, com isso, que as rotas podem ser escolhidas conforme a variabilidade do tempo t e, dentre outros aspectos, é uma oportunidade para o transportador lançar mão de uma rota de tempo mínimo e igualmente confiável. A confiabilidade, desta forma, é categorizada pela gradação da Tabela 18.

Tabela 18 – Gradação da confiabilidade

<i>Confiabilidade</i>	<i>Valor da Variância</i>
Alta	<0,20
Média	<0,90
Baixa	≥0,90

Fonte: Elaborada pelo autor.

Arcos com valores menores do que $0,20 \text{ min}^2$ são considerados confiáveis, haja vista que o tempo oscila menos do que os demais arcos do sistema. Aqueles que possuem variância igual ou acima de $0,90 \text{ min}^2$ são pouco confiáveis, uma vez que o seu tempo de percurso varia acima dos demais arcos. A próxima etapa do experimento é mensurar o risco.

6.2.2 Medição do risco

Conforme exposto no Item 5.5, a medição do risco foi realizada em função das variáveis de velocidade média (Vel_Veic) e volume médio de tráfego (Vol_Veic) no *link*. As variáveis foram obtidas conforme a alocação dos veículos de carga na rede, onde para cada arco se observou o volume de veículos que o utilizaram e a velocidade média.

Nesse tocante, converteu-se os valores de ambas as variáveis em números codificados, conforme Equação 18 do Capítulo 5. A variável resposta (VR), produto de uma equação exponencial, cujos parâmetros seguem os valores calibrados por Cardoso e Goldner em trechos urbanos de cidade de porte semelhante (Porto Alegre), consoante Tabela 19 à seguir.

Tabela 19 – Constantes da variável resposta

<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
<i>Bo (constante)</i>	1,4338
<i>Bi (Vol_Veic)</i>	0,7724
<i>Bi (Vel_Veic)</i>	-0,4388

Fonte: Cardoso e Goldner (2007).

O resultado da equação da variável resposta tem como maior índice de risco o arco 70 (37,32) e menor o arco 19 (13,97). Significa que no primeiro caso os fatores de risco expõem o arco de forma mais incisiva do que no segundo. A relação completa das variáveis respostas consta no Apêndice.

Assim como a confiabilidade, o atributo do risco é categorizado na Tabela 20 conforme gradação: alto médio e baixo.

Tabela 20 – Gradação do risco

<i>Risco</i>	<i>Valor da VR</i>
Alto	$\geq 25,00$
Médio	$< 25,00$
Baixo	$< 18,00$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Arcos com variáveis resposta menores do que 18,00 são considerados de baixo risco. Aqueles que possuem as variáveis iguais ou maiores do que 25,00 são mais propensos à acidentes que provocam ruptura. A Tabela 21 demonstra a classificação dos quinze arcos de maiores e menores riscos. A escolha dos cenários para corte e simulação far-se-á através desta relação.

Tabela 21 – Classificação dos arcos de maiores e menores riscos

<i>Classificação</i>	<i>Arco</i>	<i>Alto</i>	<i>Arco</i>	<i>Baixo</i>
1	70	37,32	9	13,97
2	71	36,64	19	13,97
3	42	35,61	29	13,97
4	55	32,53	39	13,97
5	74	32,33	50	13,97
6	47	31,85	60	13,97
7	52	31,61	69	13,97
8	66	28,33	20	13,99
9	45	27,59	10	13,99
10	44	26,98	49	14,00
11	43	26,96	59	14,01
12	73	26,82	68	14,01
13	4	26,68	40	14,03
14	51	26,50	30	14,03
15	17	26,41	33	15,24

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme os atributos de confiabilidade e risco de cada arco, foram classificados os arcos a serem bloqueados nos testes. O direcionamento de quais arcos serão rompidos será de acordo com o cenário estabelecido.

6.3 Simulação

Busca-se no experimento representar um escopo abrangente de situações de eventos que interrompam o fluxo de determinado arco, com impactos no tempo e no custo distintos. Posteriormente, analisam-se os desdobramentos pós-incidente de forma a estabelecer conclusões a respeito da escolha dessas rotas no âmbito do risco, da confiabilidade e da vulnerabilidade.

Conforme exposto no Tópico 6.2, serão tratados nove cenários, baseados nas situações apresentadas anteriormente.

- a) cenário 1: representa a situação em que a rede opera sem falhas nos arcos, onde todo o volume da Matriz OD é alocado considerando a capacidade plena;
- b) cenário 2: neste cenário é simulada uma falha no Arco 17 (alto risco), onde

- trafegam 30 dos 160 VUC's. A capacidade, então, é reduzida à 1 veículo por hora;
- c) cenário 3: igualmente ao cenário 2, objetiva-se analisar os efeitos no tempo de uma falha no Arco 47 (alto risco). Reduz-se a capacidade de 2.500 vph para 1 vph;
 - d) cenário 4: objetiva simular redução na capacidade do Arco 62, de baixo risco (índice de 17,44);
 - e) cenário 5: ocorre falha no Arco 19, também de baixo risco (13,97);
 - f) cenário 6: a partir deste cenário, as falhas se baseiam na confiabilidade dos arcos. A falha ocorre no Arco 72 que apresentou variância elevada de 0,98 min²;
 - g) cenário 7: falha no Arco 63 de alta variabilidade do tempo de percurso (0,98 min²);
 - h) cenário 8: apresenta interrupção no Arco 13 de baixa variabilidade (0,12 min²);
 - i) cenário 9: o último cenário do experimento realiza um corte no Arco 36, cuja variância é a menor da rede viária (0,02 min²).

Os cenários espelham as situações extremas de confiabilidade e risco, cujos indicadores foram aferidos após a alocação dos caminhões na rede de transportes. Salienta-se que no Cenário 1 será analisada a qualidade da entrega, em termos da variabilidade do tempo e do risco da rota.

A Tabela 22 mostra os cenários escolhidos. Reforça-se que uma variabilidade alta do tempo de viagem significa que o arco apresenta baixa confiabilidade.

Tabela 22 – Arcos escolhidos para os cenários

<i>Atributo</i>	<i>Índice alto</i>	<i>Índice baixo</i>
Risco	17, 47	62, 19
Confiabilidade	13, 36	72, 63

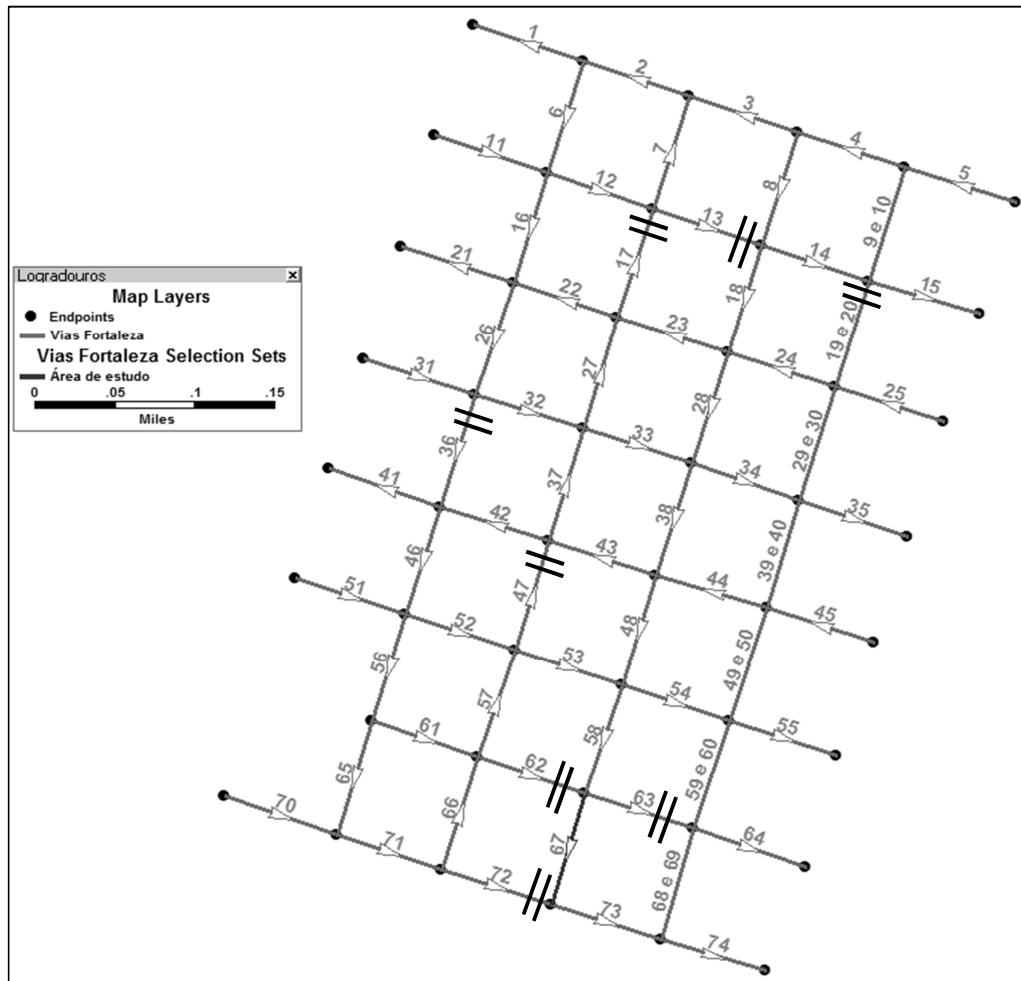
Fonte: Elaborada pelo autor.

Optou-se por escolher arcos quem não estejam nas extremidades do sistema. Isso se deve à importância de haver arcos auxiliares que possam ser acessados pelos veículos que trafeguem através da rota interrompida. Caso, por exemplo, fosse rompido algum *link* que não possuísse outro arco alternativo, os motoristas não teriam outra opção senão se manter na rota ou cancelarem a viagem.

Nesse contexto o delta de desempenho seria evidente quanto ao aumento do tempo da rota, entretanto os custos monetários (combustível, pneu e lubrificante) não teriam alterações

substanciais, haja vista que a quilometragem percorrida seria a mesma do cenário anterior. A Figura 23 consolida todos os arcos a ser rompidos.

Figura 23 – Representação dos arcos obstruídos



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, os arcos 13, 17, 19, 36, 47, 62, 63 e 72 se caracterizam por estarem em zonas de alta Flexibilidade dos arcos (discutido no Item 2.2.4). Logo, existem rotas alternativas passíveis de serem escolhidas em caso de evento intempestivo.

6.3.1 Resultados

Os resultados foram separados por atributo, uma vez que se busca analisar os efeitos separadamente. No Apêndice se tem a confiabilidade e o risco obtidos para cada arco da rede no Cenário 1.

6.3.1.1 Cenários de risco (2 ao 5)

A primeira situação de corte será no Arco 17 (Cenário 2). O qual se caracteriza por servir de caminho para cinco rotas descritas na Tabela 23:

Tabela 23 – Rotas dos pares OD que trafegam pelo Arco 17

<i>Arco 17</i>	<i>30-01</i>	<i>42-01</i>	<i>06-01</i>
Rotas	B, C	A	B, C

Fonte: Elaborada pelo autor.

A capacidade do arco é de 2.500 vph e o fluxo de veículos que trafegam na via é de 4.159 vph, considerando veículos de passeio. Após a alocação dos VUC's, 30 caminhões foram inseridos nesse arco pelo modelo de equilíbrio de Wardrop. Dessa maneira, o tempo de viagem deste arco é de 21,85 segundos a uma velocidade média de 19 km/h no cenário de pré-incidente em horário de pico (08:00-09:00).

Conforme evidenciado na tabela anterior o Arco 17 é responsável por realizar a ligação das origens distintas (06, 30 e 42) com o nó 01. O indicador de risco é alto (26,41), possuindo confiabilidade média (0,25 min²). Ao simular o corte deste arco, tem-se a seguinte configuração de custos agregados (o qual considera o somatório de todos os 160 VUC's):

Tabela 24 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 17, Cenário 2)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	R\$ 19,88	R\$ 20,52	R\$ 15,76	R\$ 56,16
6--20	R\$ 24,98	R\$ 21,43	R\$ 14,30	R\$ 60,71
6--47	R\$ 9,15	R\$ 22,39	R\$ 18,77	R\$ 50,31
30--01	R\$ 34,96	R\$ 25,56	R\$ 37,37	R\$ 97,89
30--20	R\$ 22,53	R\$ 22,53	R\$ 39,56	R\$ 84,61
30--47	R\$ 10,07	R\$ 11,11	R\$ 24,66	R\$ 45,84
42--01	R\$ 18,85	R\$ 46,15	R\$ 40,38	R\$ 105,38
42--20	R\$ 20,84	R\$ 39,24	R\$ 33,47	R\$ 93,54
42--47	R\$ 15,23	R\$ 15,30	R\$ 12,13	R\$ 42,66
Total	R\$ 176,50	R\$ 224,21	R\$ 236,41	R\$ 637,12

(i)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	22,87%	-0,61%	-1,66%	6,26%
6--20	17,35%	20,08%	31,75%	21,45%
6--47	0,00%	15,59%	19,17%	13,64%
30--01	49,28%	28,84%	54,16%	45,03%
30--20	35,16%	35,16%	51,16%	42,20%
30--47	0,00%	-17,85%	45,47%	13,06%
42--01	-41,14%	71,20%	22,46%	14,60%
42--20	-31,23%	63,46%	11,48%	10,93%
42--47	17,96%	0,00%	-8,73%	2,79%
Total	2,60%	28,75%	26,90%	19,66%

(ii)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O custo generalizado agregado dos 160 caminhões sobe em 19,66% (de R\$ 532,45 no *status quo* para R\$ 637,12), ou seja, R\$ 104,67 de incremento. Ao verificar o percentual de aumento, observa-se aumento no custo para todas as rotas, mas nos percursos B e C (caracterizados por ser as rotas mais longas) o aumento do valor é mais evidente.

Quando se observa a visão desagregada, isto é, o custo da falha da rota para somente um motorista, o custo se comporta de maneira particular. Por exemplo, na Rota A entre os pontos 42 e 01 o custo generalizado desagregado é de R\$ 0,69 (Tabela 25). Ao verificar que a rota está obstruída no Arco 17, o motorista é forçado a realizar um desvio de oito arcos a mais do que seria previsto inicialmente. Assim, o custo passa a ser de R\$ 1,19 para o mesmo par OD.

Caso o transportador optasse por uma rota de menor risco (no caso de B e C) o custo da viagem seria inicialmente maior (R\$ 0,94). Contudo, as rotas apresentariam índices de risco menores, haja vista que não trafegam pelo Arco 17, podendo, em caso de falha, ser 21% mais econômica do que a rota de caminho mínimo. Trata-se, portanto, de uma escolha do transportador em assumir rotas de maiores riscos.

Tabela 25 – (i) custo generalizado desagregado

<i>Par OD</i>	<i>42-01</i>
Custo generalizado (quo)	R\$ 0,69
Custo generalizado (falha 17)	R\$ 1,19
Delta	73%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O mesmo procedimento fora realizado no Arco 47, também de alto risco (31,85), o qual possui quatro rotas que o percorrem. Essa via possui capacidade de 2.500 vph e um fluxo médio de 4.945 vph. O tempo de percurso do arco é de 31,83 segundos a velocidade média de

12 km/h., ou seja, trata-se de um arco saturado da rede viária. A Tabela 26 mostra as rotas que trafegam pelo *link* escolhido.

Tabela 26 – Rotas dos pares OD que trafegam pelo Arco 47

<i>Arco 47</i>	<i>42-20</i>	<i>42-01</i>
Rotas	A, C	A, C

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse tocante, o custo generalizado agregado resultante de falha no Arco 47, de alto risco, é estratificado por par OD na Tabela 27. Logo, significa que ao ocorrer um acidente que interfira na capacidade desse arco, o custo para todos os veículos subirá 19,78%. Comportamento decorrente da alteração de rotas mais curtas para rotas mais longas, que demandam maior quilometragem.

Tabela 27 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 47, Cenário 3)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	R\$ 18,06	R\$ 22,34	R\$ 19,42	R\$ 59,82
6--20	R\$ 23,15	R\$ 21,43	R\$ 16,13	R\$ 60,71
6--47	R\$ 9,15	R\$ 22,63	R\$ 16,70	R\$ 48,48
30--01	R\$ 33,38	R\$ 30,37	R\$ 38,53	R\$ 102,28
30--20	R\$ 25,51	R\$ 25,51	R\$ 37,06	R\$ 88,09
30--47	R\$ 10,07	R\$ 9,95	R\$ 26,73	R\$ 46,75
42--01	R\$ 16,04	R\$ 49,46	R\$ 29,77	R\$ 95,27
42--20	R\$ 16,20	R\$ 48,02	R\$ 28,34	R\$ 92,55
42--47	R\$ 17,55	R\$ 15,30	R\$ 10,97	R\$ 43,82
Total	R\$ 169,12	R\$ 245,01	R\$ 223,65	R\$ 637,78
(i)				
<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	11,58%	8,23%	21,12%	13,17%
6--20	8,78%	20,08%	48,56%	21,45%
6--47	0,00%	16,86%	6,01%	9,52%
30--01	42,54%	53,10%	58,95%	51,53%
30--20	53,07%	53,07%	41,64%	48,04%
30--47	0,00%	-26,43%	57,70%	15,31%
42--01	-49,93%	83,46%	-9,71%	3,60%
42--20	-46,54%	100,06%	-5,62%	9,76%
42--47	35,92%	0,00%	-17,45%	5,59%
Total	-1,69%	40,70%	20,06%	19,78%
(ii)				

Fonte: Elaborada pelo autor.

O custo desagregado no cenário 3, observando a mesma Rota A aumenta em 36% quando o motorista é forçado a alterar o percurso quando avista a interrupção (Tabela 28). O

delta se justifica por que o motorista realizará desvio de quatro arcos a mais em relação ao cenário 1.

Tabela 28 – Custo generalizado desagregado do par (42,01)

<i>Par OD</i>	<i>42-01</i>
Custo generalizado (quo)	R\$ 0,69
Custo generalizado (falha 17)	R\$ 0,94
Delta	36%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O próximo cenário, busca identificar os custos da falha em arcos de baixo risco (índice menor do que 0,20) Portanto, no cenário 4, realizou-se um corte no Arco 62 cujas rotas que o utilizam são duas (vide Tabela 29). Este arco possui capacidade de 2.500 vph e um fluxo de 2.600 vph em horário de pico. A velocidade média é de 34 km/h, desta forma, trata-se de um arco de menor carregamento em relação aos dois anteriores.

Tabela 29 – Rotas dos pares OD que trafegam pelo Arco 62

<i>Arco 62</i>	<i>42-47</i>
Rotas	B, C

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Arco 62 é responsável pelo fluxo alternativo entre o par 42-47. É interessante salientar que as rotas A, são sempre as de caminho mínimo (fluxo livre), nesse contexto as rotas B e C representam as segundas e terceiras opções dos caminhoneiros, respectivamente. Tal característica, o torna menos utilizado em relação aos demais arcos da rede. O custo generalizado agregado se comporta conforme a Tabela 30.

Tabela 30 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 62, Cenário 4)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	R\$ 16,12	R\$ 20,68	R\$ 16,29	R\$ 53,09
6--20	R\$ 21,22	R\$ 17,85	R\$ 11,07	R\$ 50,14
6--47	R\$ 9,27	R\$ 19,30	R\$ 15,71	R\$ 44,29
30--01	R\$ 23,42	R\$ 20,02	R\$ 24,37	R\$ 67,80
30--20	R\$ 16,79	R\$ 16,79	R\$ 26,18	R\$ 59,77
30--47	R\$ 10,08	R\$ 13,48	R\$ 17,03	R\$ 40,59
42--01	R\$ 32,03	R\$ 26,98	R\$ 32,96	R\$ 91,96
42--20	R\$ 30,26	R\$ 24,15	R\$ 30,13	R\$ 84,54
42--47	R\$ 12,91	R\$ 15,30	R\$ 13,29	R\$ 41,50
Total	R\$ 172,11	R\$ 174,55	R\$ 187,02	R\$ 533,67

(i)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	-0,40%	0,18%	1,62%	0,44%
6--20	-0,33%	0,02%	2,01%	0,30%
6--47	1,35%	-0,33%	-0,28%	0,03%
30--01	-0,01%	0,94%	0,50%	0,45%
30--20	0,74%	0,74%	0,05%	0,44%
30--47	0,10%	-0,29%	0,45%	0,11%
42--01	0,02%	0,07%	-0,07%	0,00%
42--20	-0,12%	0,60%	0,35%	0,25%
42--47	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Total	0,05%	0,23%	0,39%	0,23%

(ii)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O custo aumenta somente 0,23% em relação ao *status* de pré-incidente, ou seja, o comportamento do motorista não se altera de maneira significativa a ponto de percorrer uma quilometragem suficientemente superior à anterior.

Resultado semelhante ocorre ao obstruir outro arco de baixo risco (13,97). No Arco 19, a capacidade é de 1.250 vph (apenas uma faixa), possui fluxo médio de 1.300 vph a velocidade de 34 km/h. Por esta via, percorrem três rotas distintas (Tabela 31).

Tabela 31 – Rotas dos pares OD que trafegam pelo arco 19

<i>Arco 19</i>	<i>06-20</i>	<i>06-47</i>	<i>06-30</i>
Rotas	C	A	C

Fonte: Elaborada pelo autor.

De natureza igual ao anterior, neste quinto cenário o custo agregado aumenta 0,10% em relação ao *status quo* (Tabela 32). Essa observação, indica que apesar de o Arco 19 registrar velocidade média acima dos arcos de alto risco, o baixo índice de fluxo que trafega pelo arco o torna menos propenso à acidentes.

Tabela 32 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Arco 19, Cenário 5)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	R\$ 16,27	R\$ 20,61	R\$ 15,96	R\$ 52,84
6--20	R\$ 21,41	R\$ 17,82	R\$ 10,79	R\$ 50,03
6--47	R\$ 9,14	R\$ 19,37	R\$ 15,77	R\$ 44,29
30--01	R\$ 23,57	R\$ 19,82	R\$ 24,34	R\$ 67,73
30--20	R\$ 16,64	R\$ 16,64	R\$ 26,38	R\$ 59,66
30--47	R\$ 10,08	R\$ 13,48	R\$ 16,96	R\$ 40,52
42--01	R\$ 31,96	R\$ 27,13	R\$ 33,11	R\$ 92,20
42--20	R\$ 30,24	R\$ 23,99	R\$ 29,97	R\$ 84,21
42--47	R\$ 12,91	R\$ 15,30	R\$ 13,29	R\$ 41,50
Total	R\$ 172,24	R\$ 174,17	R\$ 186,57	R\$ 532,98

(i)

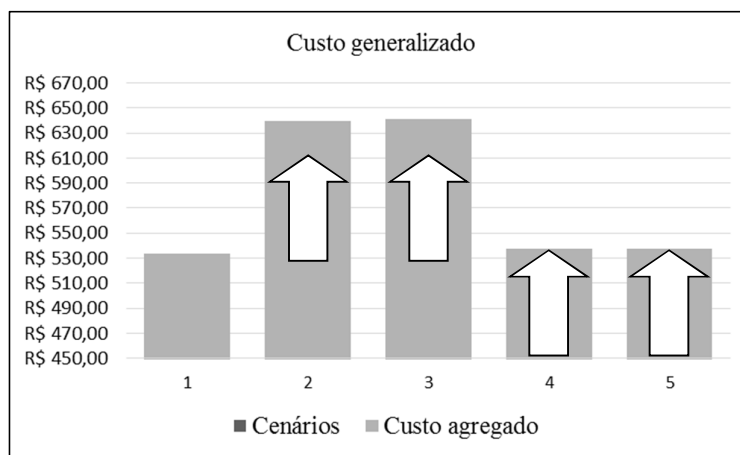
<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6--01	0,55%	-0,16%	-0,46%	-0,03%
6--20	0,60%	-0,10%	-0,63%	0,08%
6--47	-0,10%	0,01%	0,14%	0,03%
30--01	0,64%	-0,08%	0,41%	0,35%
30--20	-0,18%	-0,18%	0,80%	0,25%
30--47	0,10%	-0,29%	0,05%	-0,05%
42--01	-0,20%	0,64%	0,40%	0,26%
42--20	-0,19%	-0,04%	-0,17%	-0,14%
42--47	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Total	0,13%	0,02%	0,15%	0,10%

(ii)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do experimento, dados os cenários de cortes baseados no indicador de risco, denotam que vias de maior densidade de veículos, conseqüentemente menor velocidade média, apresentam maior probabilidade de ocorrência de acidentes. O Gráfico 7 resume os índices logrados.

Gráfico 7 – Aumento de custos por cenário



Fonte: Elaborada pelo autor.

Notabiliza-se que nos arcos de maiores riscos, o impacto de um acidente é indubitavelmente superior em termos de custos monetários para o transportador, haja vista que os custos da interrupção são superiores em relação aos cenários de baixo risco. No experimento simulado, o valor pode atingir 73% a mais de gastos com combustíveis, pneus e lubrificantes ao analisar de maneira desagregada (por usuário).

Denota-se que o risco, conforme exposto nos capítulos anteriores, está intimamente relacionado com a vulnerabilidade da rede. Observa-se que arcos com maior probabilidade de vir à falhar geram maiores impactos na rede (visão agregada) e nos usuários (visão desagregada).

em termos de tempo e custo. O recorte da rede viária evidencia o maior peso do volume de veículos sobre o indicador de risco. Salienta-se, então, que os arcos de maior risco acarretam em maior variação do custo monetário devido, entre outros aspectos, à maior quantidade de veículos alterando a rota.

No âmbito da qualidade da entrega, ou seja, identificação das rotas de menor risco com objetivo de reduzir eventual custo com redirecionamento através de medidas de contingência, mediu-se o risco de cada rota entre cada par OD. Exercício demonstrado na Tabela 33.

Nota-se que existe a tendência de as rotas A possuírem menor risco agregado, uma vez que a quantidade de arcos normalmente é menor. Entretanto, não é regra o caminho mínimo conter menos arcos, pois, considerou-se nesse experimento as impedâncias limitadoras de cada arco. Portanto, a depender do arco, as rotas alternativas podem assumir riscos menores do que as respectivas rotas principais.

Tabela 33 – (i) risco total das rotas; (ii) custo generalizado desagregado da rota

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>
6--01	120,93	203,28	183,25
6--20	186,89	148,57	126,08
6--47	153,62	244,96	211,81
30--01	190,57	187,58	261,69
30--20	138,24	138,24	247,14
30--47	101,95	170,05	214,95
42--01	293,69	320,23	343,82
42--20	258,37	291,31	314,90
42--47	157,06	198,28	183,53
(i)			
<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>
6--01	R\$ 0,31	R\$ 0,56	R\$ 0,56
6--20	R\$ 0,50	R\$ 0,50	R\$ 0,44
6--47	R\$ 0,56	R\$ 0,69	R\$ 0,69
30--01	R\$ 0,56	R\$ 0,56	R\$ 0,82
30--20	R\$ 0,75	R\$ 0,44	R\$ 0,50
30--47	R\$ 0,31	R\$ 0,44	R\$ 0,69
42--01	R\$ 0,69	R\$ 0,94	R\$ 0,94
42--20	R\$ 0,63	R\$ 0,88	R\$ 0,88
42--47	R\$ 0,31	R\$ 0,44	R\$ 0,44
(ii)			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa análise se baseia no Cenário 1, rede plena. O intuito não é mais medir o impacto da falha, mas o risco da rota em si. Observa-se a existência de três rotas alternativas que possuem risco de obstrução menor do que as respectivas rotas principais. As duas primeiras

são componentes do par OD (06-20). Para efeito de comparação, a Tabela 34 demonstra as características de cada rota. O risco da rota é o somatório dos riscos dos arcos que a compõe.

Tabela 34 – Risco *versus* custo generalizado (Par 06-20)

<i>06--20</i>	<i>Tempo de viagem</i>	<i>%</i>	<i>Risco</i>	<i>%</i>	<i>Custo</i>	<i>%</i>
Rota A	104,28	-	186,89	-	R\$ 0,50	-
Rota B	101,06	-3%	148,57	-21%	R\$ 0,50	0%
Rota C	99,51	-5%	126,08	-33%	R\$ 0,44	-12%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme verificado na relação, tanto o risco como o custo da Rota C são inferiores aos mesmos atributos da Rota A. Essa característica indica que se o transportador adotar a Rota C (até mesmo a B) implicará em um risco 33% menor de obstrução e um custo generalizado 12% inferior.

Esses índices refletem uma situação não comum no contexto de escolha de rotas, haja vista que o algoritmo de Dijkstra (1959) busca minimizar o tempo da Rota A, onde as rotas B e C são as segundas e terceiras mais rápidas. Contudo, ao alocar os veículos urbanos de carga, seguindo os preceitos do modelo de equilíbrio, à depender das rotas que os motoristas optarem, a classificação do tempo mínimo poderá ser alterada entre elas.

Dito isso, a terceira situação de rota alternativa que possui risco de obstrução menor do que a Rota A é entre o par (30, 01). Contexto exibido na Tabela 35.

Tabela 35 – Risco *versus* custo generalizado (Par 30-01)

<i>30--01</i>	<i>Tempo de viagem</i>	<i>%</i>	<i>Risco</i>	<i>%</i>	<i>Custo</i>	<i>%</i>
Rota A	110,66	-	190,57	-	R\$ 0,50	-
Rota B	129,15	17%	187,58	-2%	R\$ 0,44	-12%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta situação, verifica-se que a Rota B possui risco combinado 2% inferior de obstrução do que a Rota A, assim como o custo generalizado é 12% inferior. Contudo, o tempo de viagem da Rota B é 17% superior ao da Rota A. Isso significa que um motorista que adotar a Rota B em sua viagem, entre os nós 30 e 01, deverá arcar com risco e custo menores, entretanto a viagem demorará cerca de 17% a mais em relação à situação inversa.

Nesse contexto, os índices não são significativos suficiente à ponto de se obter uma conclusão acerca da escolha dessa rota. Nesse caso, a decisão é intrínseca à natureza do transporte dessa mercadoria. Se o transportador priorizar o atributo de tempo deverá arcar com um risco e custo superior da viagem.

No próximo item são analisados os resultados da confiabilidade como atributo direcionador de cortes na rede e fator de decisão para escolha de rota baseada na variabilidade do tempo médio de viagem.

6.3.1.2 Cenários de confiabilidade (6 ao 9)

Sabe-se que a confiabilidade está relacionada à variabilidade do tempo de viagem. Esse conceito pode ser diretamente atrelado à qualidade da entrega pelo transportador.

A variabilidade do tempo pode ter várias causas, cabe um trabalho de caracterização e diagnóstico para averiguar essas causas e os efeitos da oscilação do tempo. No tocante da confiabilidade, este experimento busca fazer um trabalho de caracterização da rede, não buscando aferir a causa da variabilidade.

Os quatro cenários restantes, realizam bloqueios em arcos da rede baseados na variância (alta e baixa), então, mede o custo generalizado para os veículos urbanos de carga. O intento inicial, é avaliar se a confiabilidade pode ser um direcionador da vulnerabilidade da rede. Em paralelo, analisar a adoção da confiabilidade como critério de escolha de rota.

Os arcos escolhidos para os cenários foram: 72, 63, 13 e 36 (vide Tabela 36). São vias que apresentaram altas e baixas variabilidades do tempo de percurso. Os dois primeiros representam arcos com alta variabilidade no tempo de viagem, ao passo que os últimos são os que possuem baixa variabilidade.

Tabela 36 – Atributos dos arcos

<i>Arco</i>	<i>Variância (min²)</i>	<i>Capacidade (vph)</i>	<i>Volume (vph)</i>	<i>Tempo(seg)</i>	<i>Velocidade (km/h)</i>
72	0,98	2.500	4.146	11,70	28
63	0,98	2.500	2.600	11,95	34
13	0,12	2.500	2.500	14,35	35
36	0,02	2.500	3.851	18,28	22

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em processo idêntico ao da estimação do custo do risco foram atribuídos cortes em cada arco isoladamente. Os resultados (em custo generalizado) foram estruturados na Tabela 37.

Tabela 37 – (i) custo generalizado agregado; (ii) percentual de aumento. (Totais)

<i>Cenário</i>	<i>Variabilidade</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6 (Arco 72)	Alta	R\$ 173,52	R\$ 173,64	R\$ 192,31	R\$ 539,47
7 (Arco 63)	Alta	R\$ 172,02	R\$ 174,14	R\$ 186,29	R\$ 532,45
8 (Arco 13)	Baixa	R\$ 172,02	R\$ 174,14	R\$ 186,29	R\$ 532,45
9 (Arco 36)	Baixa	R\$ 172,02	R\$ 174,14	R\$ 186,29	R\$ 532,45

(i)

<i>Cenário</i>	<i>Variabilidade</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>Total</i>
6 (Arco 72)	Alta	0,87%	-0,29%	3,23%	1,32%
7 (Arco 63)	Alta	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
8 (Arco 13)	Baixa	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
9 (Arco 36)	Baixa	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

(ii)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados para a confiabilidade como direcionadores da vulnerabilidade foram inconclusivos. Ao contrário do que inicialmente inferido, não houve correlação entre alta variabilidade do tempo de percurso com o custo desse arco para a rede no experimento realizado, ou seja, de acordo com os resultados não é possível aferir que um arco com alta variabilidade, caso venha a falhar, implicará em aumento de custos para o transportador. Conforme experimento, o único cenário de corte que alterou o custo generalizado fora o sexto. Entretanto, o delta de 1,32% não é expressivo o suficiente para indicar uma linha de tendência.

No quesito da qualidade da entrega, ou seja, identificação das rotas mais confiáveis, mediu-se o tempo de entrega para cada rota entre cada par OD. O produto dessa atividade é visto na Tabela 38.

Tabela 38 – Tempo de viagem por rota (em segundos)

<i>O--D</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>	<i>TOTAL</i>
6--01	48,65	116,51	114,96	280,11
6--20	104,28	101,06	99,51	304,84
6--47	118,59	156,60	140,72	415,91
30--01	110,66	129,15	166,07	405,88
30--20	113,70	144,88	166,29	424,86
30--47	84,97	126,67	166,42	378,06
42--01	230,65	224,34	244,90	699,89
42--20	215,20	227,38	247,94	690,53
42--47	126,92	163,07	156,16	446,15
			□	4.046,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 38 mostra os tempos de viagem de cada rota com a rede em equilíbrio. Tal situação espelhará somente o cenário de rede sem incidentes, uma vez que o objetivo desta

sub-etapa é analisar o ganho em medir a confiabilidade da rota de uma entrega em meio urbano adensado.

É irrefutável que cada rota possui arcos com características e confiabilidades distintas, mas isso não necessariamente está visível no tempo de viagem. Uma rota com tempo de viagem médio curto, pode apresentar uma alta variabilidade deste atributo. À depender do usuário, este desempenho é insatisfatório, sendo mais interessante optar por rotas que variem menos o tempo de entrega. Desta maneira, mediu-se a variância de cada rota entre cada origem e destino. O resultado é exposto na Tabela 39, abaixo:

Tabela 39 – (i) variância do tempo de viagem (minutos); (ii) custo generalizado desagregado da rota

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>
6--01	1,48	2,91	3,99
6--20	1,27	2,46	3,73
6--47	4,70	3,99	4,64
30--01	3,37	4,11	5,19
30--20	3,39	3,39	3,35
30--47	2,87	3,09	4,83
42--01	4,29	8,53	6,60
42--20	4,05	8,84	6,91
42--47	4,90	5,35	5,64

(i)

<i>Caminho</i>	<i>Rota A</i>	<i>Rota B</i>	<i>Rota C</i>
6--01	R\$ 0,31	R\$ 0,56	R\$ 0,56
6--20	R\$ 0,50	R\$ 0,50	R\$ 0,44
6--47	R\$ 0,56	R\$ 0,69	R\$ 0,69
30--01	R\$ 0,56	R\$ 0,56	R\$ 0,82
30--20	R\$ 0,75	R\$ 0,44	R\$ 0,50
30--47	R\$ 0,31	R\$ 0,44	R\$ 0,69
42--01	R\$ 0,69	R\$ 0,94	R\$ 0,94
42--20	R\$ 0,63	R\$ 0,88	R\$ 0,88
42--47	R\$ 0,31	R\$ 0,44	R\$ 0,44

(ii)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma que na análise do risco, existe a tendência de as rotas A possuírem menor variabilidade do tempo do que as rotas B e C, uma vez que a quantidade de arcos usualmente é inferior. Contudo, no experimento, ao considerar as características de cada arco (capacidade, velocidade etc.) é possível haver uma rota B ou C com variância de tempo menor do que a A, desde que contenham arcos com menor variância.

A rede viária modelada no experimento apresentou duas observações onde a confiabilidade das rotas B e C são maiores do que as respectivas rotas A. Conforme exibido nas

tabelas anteriores a Rota B, entre os pares 6 e 47, apresenta variância de 3,99 min² e desvio padrão de 2,00 min, enquanto a Rota A apresenta variância de 4,70 min² e desvio padrão de 2,17 min. O cenário é melhor visualizado na Tabela 40.

Tabela 40 – Confiabilidade *versus* custo generalizado (Par 06-47)

<i>6--47</i>	<i>Variância</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>%</i>	<i>Custo</i>	<i>%</i>
Rota A	4,70	2,17	-	R\$ 0,56	-
Rota B	3,99	2,00	-8%	R\$ 0,69	23%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para efeito da escolha de rota baseada na confiabilidade do tempo de entrega, a Rota B apresenta uma medida de dispersão dos valores menor do que a Rota A. Isto significa que em uma rota, a variância do tempo em B seria 8% menor do que se o motorista seguisse a Rota A. A ponderação está refletida no custo generalizado, haja vista que a Rota B gera custo 23% superior para o motorista (conforme já comentado, representa um caminho mais demorado). Salienta-se que o tempo de viagem da Rota B é 32% superior ao da Rota A.

Dessa forma, o critério de decisão deverá estar baseado na prioridade da entrega. Produtos com nota fiscal de maior valor agregado tendem à manifestar maiores preocupações com o prazo da entrega pelos transportadores. Assim, é possível optar por uma rota mais demorada e onerosa, desde que a confiabilidade de que o tempo fique em uma margem aceitável for superior.

A segunda rota em que se evidenciou vantagem em rotas alternativas fora entre os pares 30 e 20. Nesta entrega, a Rota C apresentou vantagens nos dois aspectos analisados. O desvio padrão é cerca de 1% menor e o custo generalizado 33% menor do que a Rota A (vide Tabela 41).

Tabela 41 – Confiabilidade *versus* custo generalizado (Par 30-20)

<i>30--20</i>	<i>Variância</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>%</i>	<i>Custo</i>	<i>%</i>
Rota A	3,39	1,84	-	R\$ 0,75	-
Rota C	3,35	1,83	-1%	R\$ 0,50	-33%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Esses números se justificam devido à Rota C possuir menos arcos em sua composição, apesar de ter um tempo de viagem 46% superior à Rota A. Enquanto a Rota A trafega por 12 arcos até chegar ao seu destino, a Rota C trafega somente por 8 arcos até o nó de

destino. Essa característica torna o custo generalizado (que é somente variável nesse experimento) menos oneroso na Rota C.

O mesmo princípio justifica a confiabilidade maior na Rota C, uma vez que o veículo trafegará por menos arcos, tendo maior propensão à uma variabilidade menor do tempo da viagem.

No segundo caso, a escolha pela Rota C é facilitada por possuir os dois atributos com índices superiores, porém, o tempo de viagem ainda é 46% maior em relação ao da Rota A. Conforme discutido anteriormente, trata-se de um critério de escolha endógeno à cada fornecedora e transportadora. Conhecer a confiabilidade é, portanto, mais uma ferramenta de análise de escolha da rota.

6.4 Considerações do capítulo

O presente capítulo contribuiu com a pesquisa ao aplicar e discutir o método de representação do custo (combustível, pneu e lubrificante) da escolha de rota, além de realizar experimento, considerando os atributos de confiabilidade, vulnerabilidade e risco.

Buscou-se analisar o impacto que a ruptura de um arco gera nos custos agregados e desagregados da rede, de forma a utilizar como direcionadores da vulnerabilidade os atributos da confiabilidade e do risco. O segundo objetivo foi analisar o atributo da confiabilidade e do risco (em seções separadas) como elementos de ponderação na escolha da rota, pois, entende-se que o tempo esperado de viagem e o custo generalizado não são suficientes para uma decisão com alta acurácia. A depender da natureza do negócio, possuir a informação acerca da confiabilidade ou do risco da rota é não apenas válido, como oportuno.

Os resultados esclarecem a função do risco como atributo direcionador dos cortes nos arcos para estimação da vulnerabilidade de uma rede urbana. No experimento realizado, observou-se que os arcos de alto risco apresentaram custo generalizado agregado aproximadamente 20% superior quando obstruídos. Na visão desagregada, ou seja, de somente um motorista, o custo generalizado pode ser até 73% superior em caso de corte de um arco de alto risco. Em outra vertente, as rupturas realizadas nos arcos de baixo risco apresentaram menos de 1% de acréscimo no custo generalizado da rede, ou seja, tratam-se de arcos menos vulneráveis.

No quesito da confiabilidade como direcionador para arcos vulneráveis, os resultados foram menos expressivos. Nos quatro cenários realizados, onde dois foram cortes de

arcos com alta variabilidade do tempo e dois com arcos de baixa variabilidade, os deltas de custos generalizados não tiveram alterações expressivas (pouco mais de 1%). Neste quesito, não é possível aferir a confiabilidade como um direcionador eficiente para obter os arcos mais vulneráveis de uma rede urbana.

Essas conclusões são pertinentes para contribuir com o estudo de Knoop *et al.* (2012) no que se refere à triagem dos arcos à ter a vulnerabilidade testada, discutido no Item 4.8.4, precisamente no segundo grupo de métodos. Conforme exposto no Capítulo 4, existem três grupos principais de métodos para avaliar a vulnerabilidade de uma rede. O primeiro grupo contém os métodos de cálculos completos, ou seja, onde a capacidade é reduzida para cada arco individualmente. O segundo grupo utiliza de maneira prévia critérios de arcos, onde se tem uma direção na busca de elos mais vulneráveis (exemplo: uso do solo, topologia, condições de acessibilidade, histórico de desastres, etc.), reduzindo o tempo de processamento computacional dos dados. O terceiro grupo é baseado na Teoria dos jogos.

Finalmente, o experimento evidencia a existência de *trade-off* (escolha conflitante) entre as variáveis de tempo médio de viagem, confiabilidade/risco e o custo generalizado. Apenas as informações de tempo e custo da viagem não são suficientes para suprir as condições de entrega da mercadoria. Para o transportador, deter o conhecimento da confiabilidade, ou do risco, da entrega da mercadoria pode ser um pilar estratégico de redução de custos ou de ganho de mercado à médio e longo prazo.

O experimento manifesta que a variabilidade e o risco aumentam conforme a quantidade de arcos adotada na rota. Tal característica denota que os efeitos possam ser potencializados quando se toma para simulação uma rede viária maior, inclusive no âmbito do transporte regional. Assim, entende-se que as distorções de confiabilidade e risco assumam representatividade maior para a decisão do transportador/fornecedor.

O próximo capítulo esclarece sistematicamente as conclusões da pesquisa, bem como a aderência aos objetivos e questões de pesquisa propostas.

7 CONCLUSÕES

As considerações finais acerca da pesquisa levadas a efeito, serão agrupadas em relação às questões de pesquisa e objetivos (geral e específicos) levantados no processo preliminar. O intento é dissertar sobre a aderência da pesquisa em relação aos propósitos estabelecidos inicialmente.

O método desenvolvido na pesquisa fora inspirado nos pressupostos teórico-metodológicos sobre rede de transportes, modelagem, confiabilidade, vulnerabilidade e risco. Pretendeu-se obter resultados que contribuam para o processo de transporte de mercadorias em meio urbano, em especial, no que tange à escolha da rota.

7.1 Objetivos e Questões de pesquisa

Os capítulos expostos foram divididos segundo critério de contribuição (através da exposição de seus conceitos e discussões) para o método. Nesse contexto, as questões de pesquisas e os objetivos foram os alicerces para a sua elaboração. Os itens seguintes, analisam as conclusões acerca de cada objetivo específico.

Sustenta-se que a dissolução dessas questões e objetivos específicos, torna à responder ao objetivo geral e à questão central da pesquisa.

7.1.1 *Objetivo I*

Em alusão ao objetivo:

- a) identificar e selecionar quais custos são considerados na tomada de decisão quanto a escolha de rota em área urbana adensada, pelo transportador de carga.

A coleta de dados, realizada no Item 6.1.2.1 corrobora que os componentes mais representativos do custo generalizado, para uma transportadora que opera na região do experimento, são: combustível, pneu e óleos lubrificantes. Utilizou-se, desta forma, tais componentes de custo variável na análise da decisão sobre a escolha da rota em meio urbano adensado.

7.1.2 Objetivo II

- a) verificar como o conceito de confiabilidade, vulnerabilidade e risco em termos de desempenho da rede, influem na representação do custo logístico.

Através da alocação dos fluxos, compostos pelos veículos urbanos de carga (VUC), pôde-se verificar como a confiabilidade e o risco estão relacionados com o custo logístico (generalizado). Observou-se que quanto maior a vulnerabilidade do arco para a rede, maior será a variação do custo generalizado decorrente de uma obstrução.

O risco fora inserido no âmbito da susceptibilidade de determinado arco falhar e ocasionar variações no custo logístico, mediante re-roteamento do caminhão. Esta relação demonstrou estar intrinsecamente relacionada à vulnerabilidade da rede, onde os arcos de maior risco relativo geraram maior aumento do custo generalizado.

No que concerne à confiabilidade, verificou-se que não há relação direta entre a variabilidade do tempo do arco e o custo decorrente da falha dele. Salienta-se, contudo, que o custo logístico irá depender da predisposição do motorista a assumir rotas mais confiáveis em detrimento do tempo mínimo ou do custo mínimo.

Essas relações observadas com a aplicação do método respondem à terceira questão de pesquisa, descrita desta forma:

- a) qual a relação entre os componentes do custo generalizado com os conceitos de confiabilidade, vulnerabilidade e risco?

7.1.3 Objetivo III

- a) verificar a eficácia da confiabilidade e do risco como conceitos para obtenção da vulnerabilidade da rede.

Mediante análise dos resultados das simulações dos cenários de corte, advoga-se que o atributo de desempenho do risco pode ser empregado como direcionador da vulnerabilidade de uma rede. Devido a rede estar em equilíbrio, as alterações de rotas dos motoristas afetados, para outros arcos não obstruídos, propiciam aumento do custo generalizado de forma agregada, ou seja, envolvendo os demais motoristas que trafegam no mesmo período.

O experimento comprova que os arcos de maior risco relativo (comparado com os demais arcos da mesma rede), em caso de obstrução, acarretam em aumento no custo generalizado da rede em até 20%. Contexto oposto ocorre ao interromper os arcos com menor risco relativo, onde os custos aumentam em aproximadamente 1%. Argumenta-se que os arcos

de maior risco envolvem maior saturação da via, são arcos próximos à pontos de origem e/ou de destino, oferecendo menor flexibilidade ao usuário (outro atributo de desempenho da rede viária).

No tocante da confiabilidade, os resultados não expressaram alterações no custo generalizado (independente do grau de variabilidade do tempo). As informações de saída do modelo não indicaram direcionamento para a vulnerabilidade. Conjectura-se, através dos cenários analisados, que o atributo da confiabilidade não é um direcionador apropriado para encontrar os arcos mais vulneráveis de uma rede de transportes.

Assim, este objetivo responde à segunda questão de pesquisa, abaixo.

- a) a confiabilidade e o risco dos arcos são direcionadores eficazes da vulnerabilidade da rede?

7.1.3 Objetivo IV

- a) verificar a eficiência da escolha de rota, ponderando o risco e a confiabilidade, em relação às representações que adotam o caminho mínimo.

No Capítulo 6, fora realizada a análise comparativa entre as situações: (i) motorista opta pela rota de caminho mínimo (sem a informação do carregamento da rede) e (ii) motorista escolhe, dentre a disponibilidade, a rota com menor índice de risco.

Os resultados evidenciaram que o custo com o re-roteamento para a transportadora pode atingir 73% a mais para a mesma viagem, haja vista que percorrerá um desvio maior do que o planejado. Caso a transportadora optasse pela rota de menor risco ela poderia economizar até 26% no custo generalizado, considerando que houvesse falha na rota de alto risco. Portanto, trata-se de uma decisão baseada em probabilidades, ou seja, exposição ou não ao risco no médio e longo prazo.

Em relação à confiabilidade, a análise se baseou na importância dada à qualidade de entrega da mercadoria. Entende-se como qualidade da entrega, a confiança de que tempo da viagem estará próximo ao tempo médio para a via em condições normais. O estudo demonstra que existem rotas de caminho mínimo cuja variabilidade do tempo do percurso é substancialmente mais elevada do que rotas alternativas, inclusive casos com custo generalizado superior.

À depender da natureza da transportadora, priorizar a confiabilidade da entrega pode ser mais interessante do que o caminho mínimo (mas com variância maior) entre pares

OD. Desta forma, é possível optar por uma rota mais demorada ou onerosa, desde que a confiabilidade de que o tempo fique em uma margem aceitável for superior. Trata-se, finalmente, de equilibrar variáveis conflituosas de maneira intrínseca à empresa que realiza a entrega.

7.1.4 Objetivo V

- b) verificar a relevância do uso da vulnerabilidade no processo de escolha da rota em contexto urbano.

Conforme discutido ao final do Capítulo 6, o experimento manifesta que a variabilidade e o risco aumentam conforme a quantidade de arcos existente na rota. Essa característica denota que os efeitos possam ser potencializados quando se modela uma rede maior, inclusive no âmbito do transporte regional. No caso do risco, tais efeitos estão diretamente relacionados à vulnerabilidade da rede, uma vez que se defende neste trabalho que este atributo seja um direcionador. Portanto, é factível que ao aumentar o risco de um percurso, a vulnerabilidade também aumente.

Outro fator decorre da particularidade comum às redes vulneráveis, ou seja, possuem baixa flexibilidade (rotas alternativas) e acessibilidade (facilidade de se deslocar entre zonas de uma região). Em um contexto urbano adensado essas características são atenuadas, uma vez que há uma vasta gama de possibilidades de caminhos, dificultando introduzir esse atributo como fator de decisão de escolha da rota.

Admite-se que medir a vulnerabilidade em meio urbano é mais propício na visão agregada, ou seja, medir o impacto que a falha de um *link* ocasiona para o tempo global da rede, uma vez que todos os usuários serão afetados com os deslocamentos e esse tempo adicional coletivo é significativo para o sistema. Para o transportador, o impacto que a falha de um arco gera para o sistema não deverá ser preponderante ao ponto de alterar a rota.

Desta forma, este objetivo responde à quinta questão de pesquisa:

- a) é propício inserir a vulnerabilidade no processo de escolha da rota em contexto urbano?

7.2 Recomendações para trabalhos futuros

Os resultados manifestados após a aplicação do método da pesquisa manifestaram novas questões e aprofundamentos que, futuramente, possam ser convertidos em objetivos de pesquisa. Destarte, as recomendações são:

- a) verificar o comportamento do custo generalizado, utilizando método de alocação com variáveis estocásticas inclusas (ex. Equilíbrio estocástico do usuário), de forma a simular a decisão de escolha de rota com maior fidedignidade à realidade;
- b) identificar o comportamento do método em redes viárias urbanas com a presença de porto marítimo, detectar a vulnerabilidade, confiabilidade e risco dos arcos de acesso;
- c) identificar o comportamento do método em redes viárias de abrangências regionais, em especial, que conectem pontos de produção e escoamento de mercadorias e *commodities*;
- d) adicionar novas variáveis significativas ao MPA que resultem em maior acurácia do índice de risco (ex. percentual de motociclistas, qualidade do pavimento, volume de veículos que acessam/cruzam a via etc.);
- e) inserir novos indicadores de risco que não mensurem apenas a probabilidade de ocorrência de acidentes (ex. inundações, obstruções por queda de árvores, obras, buracos no pavimento etc.);
- f) ampliar a quantidade de amostras coletadas da variável “tempo médio de viagem” entre as interseções da rede, visando obter um índice de confiabilidade mais significativo;
- g) realizar pesquisa com as transportadoras, aferindo a margem de variabilidade do tempo que elas julgam ser tolerável, onde não haja necessidade de aumentar substancialmente o preço do frete em decorrência da incerteza. Ou seja, não medir a confiabilidade em relação aos demais arcos da rede, mas medir em função da aceitabilidade do usuário;
- h) ampliar a quantidade de variáveis quem compõem o custo generalizado (ex. desgaste das peças), tornando o custo mais representativo.

Ademais, outras recomendações de pesquisas não envolvem diretamente o exposto neste trabalho, entretanto, contribuem para complementação do raciocínio proposto. Essas

recomendações envolvem pesquisar sobre os atributos de Flexibilidade e Acessibilidade (relacionados à oferta da rede de transportes) e estudá-los como direcionadores da vulnerabilidade e/ou atributos ponderadores para a escolha da rota do usuário.

REFERÊNCIAS

- ALTIPARMAK, M. GEN, L. LIN, T. PAKSOY. **A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks** *Computers & Industrial Engineering*, 51, pp. 196–215, 2006.
- BELL, M.G.H. **A game theory approach to measuring the performance reliability of transportation networks**. *Transportation Research Part B: Methodological* 34, 533–545, 2000.
- BERDICA, K. **An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done**. *Transport Policy*, v. 9, n. 2, p. 117-127, 2002.
- BRÖMMELSTROET, Marco, BERTOLINI, Luca. **The Role of Transport-Related Models in Urban Planning Practice**. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 31:2, 139-143, 2011.
- CAIXETA FILHO, José V., MARTINS, Ricardo S. **Gestão Logística do Transporte de Cargas**. 1. ed. 8. reimpr. São Paulo: Atlas, 2010.
- CAMPOS, Vânia. **Método de Alocação de Fluxo no Planejamento de Transportes em Situações de Emergência: Definição de Rotas Disjuntas**. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1997.
- CASCETTA, Enio. **Transportation System Analysis: models and applications**. 2nd edition. Springer, 2009.
- CARDOSO, G; GOLDNER, L. **Desenvolvimento e aplicação de modelos para previsão de acidentes de trânsito**. *TRANSPORTES*, v. XV, n. 2, p. 43-51, 2007.
- CHAPMAN, R.A. **The concept of exposure**. *Accident Analysis & Prevention*, v. 5, n. 2, p. 95–110, 1973.
- CHEN, A, YANG, H, LO, HK, TANG, WH. **A capacity related reliability for transportation networks**. *J Adv Transp*. 33 (2):183–200, 1999.
- CHEN, A, YANG, C, KONGSOMSAKSAKUL, S, LEE, M. **Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks**. *Netw Spat Econ* (2007) 7:241–256, 2006.
- CHEN, L., MILLER-HOOKS, E. **Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport**, *Transportation Science*, v. 46, n. 1, p. 109-123, 2012.
- COLE, Stuart. **Applied transport economics: policy, management and decision making**. 3rd edition. Kogan Page, 2005.
- COLELLA, D. A. T.; LIMA E. P., DEMARCHI S. H. **Calibração e validação do modelo fluxo-velocidade do Integration para vias urbanas semaforizadas**. In: *Anais do XVIII*

Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, v. 1, p. 453-564.

CORTHOUT, R., TAMPÈRE, C.M.J., IMMERS, L.H. **Marginal incident computation: an efficient algorithm to determine congestion spillback due to incidents**. In: Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2009.

CUSTÓDIO, M; FILHO, J. **A relevância da gestão de custos no contexto da logística empresarial: aspectos qualitativos**. XII Simpep, 2005.

DAGANZO, C. F. **On achieving stochastic user equilibrium on a transportation network**. (Working paper UCB-ITS-PWP 7704). Berkeley: Institute of Transportation Studies, University of California, 1977.

DAVIS G. **Exact local solution of the continuous network design problem via stochastic user equilibrium assignment**. Department of Civil and Mineral Engineering, University of Minnesota, 500 Pillsbury Dr. SE, Minneapolis, MN 55455, U.S.A, 1993.

DECOPE. **Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas**. Departamento de Custos Operacionais, Estudos Técnicos e Econômicos. São Paulo, 2014.

D'ESTE, G., TAYLOR, M. **Modelling network vulnerability at the level of the National strategic transport network**. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Vol. 4. No. 2. October, 2001.

DEVORE, Jay L., **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 5ª Ed. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2006.

DIJKSTRA, E.W. **A note on two problems in connection with graphs**. Numerical Mathematics 1, 269–271, 1959.

DNIT, **Manual de estudos de tráfego**. 384 p. (IPR. Publ., 723). Rio de Janeiro, 2006.

FISK, C. **Some developments in equilibrium traffic assignment methodology**. Transportation Research B, 243–255, 1980.

FORD JR., L. R. **Network Flow Theory**. Santa Monica, California, 1956.

GEN, M., ALTIPARMAK, F., & LIN, L. **A genetic algorithm for two stage transportation problem using priority-based encoding**. Or Spectrum, 28 (3), 337–354, 2006.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HAMAD, Ricardo; GUALDA, Nicolau Dionísio Fares. **Modelagem de redes logísticas com custos de inventário calculados a partir da cobertura de estoque**. Prod. São Paulo, v. 21, n. 4, 2011.

HOLLANDER, Y. PRASHKE, J. **The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis**. Springer Science+Business Media B.V. 2006.

HOSSEIN, Rajabalipour; CHESHMEHGAZ, Mohamad; ISHAK, Desa; ANTONI, Wibowo. **An effective model of multiple multi-objective evolutionary algorithms with the assistance of regional multi-objective evolutionary algorithms: VIPMOEAs**, Applied Soft Computing, v.13 n.5, p. 2863-2895, 2013.

HUANG, Zhongxiang; KUANG Aiwu; FAN, Wenting; ZHOU, Qian. **Impact of Traveler Information on Road Network Travel Time Reliability**. J Transpn Sys Eng & IT, 12(6), 93-99, 2012.

HUSDAL. **Reliability, vulnerability, costs and benefits**. Disponível em www.husdal.com/2004/08/25/reliability-and-vulnerability-versus-costs-and-benefits, 2004.

IMMERS, Ben; YPERMAN, Isaak; BLEUKX, Art. **Reliability and robustness of transportation networks**. Katholieke Universiteit Leuven, Department of Civil Engineering, Transportation Planning and Highway Engineering Kasteelpark Arenberg 40, B-3001 Heverlee, Belgium, 2004.

JENELIUS, E.; MATTSON, L. **Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study**, Transportation Research Part A, v. 46, n. 5, p. 746-760, 2012.

JENELIUS, E.; PETERSEN T.; MATTSON, L. **Importance and exposure in road network vulnerability analysis**, Transportation Research Part A, v. 40, n. 7, p 537-560, 2006.

KNOOP, V. L.; SNELDER, M.; VAN ZUYLEN, H. J.; HOOGENDOOM, S. P. **Link-level vulnerability indicators for real world networks**, Transportation Research Part A, v. 46, n. 5, p. 843-854, 2012.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas 2003.

MACÁRIO, R.; FILIPE, L. N.; REIS, V. **Mobilidade urbana sustentável e a distribuição de mercadorias**. In: Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento, Urbano, Regional, Integrado e Sustentável - Pluris, 2, 2006.

MARTEL, Alain; VIEIRA, Darli Rodrigues. **Análise e projetos de redes logísticas**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

MUÑUZURI, J.; LARRAÑETA, J.; ONIEVA, L.; CORTÉS, P. **Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement**. Cities, Vol. 22, nº 1, p. 15-28, 2005.

NICHOLSON, A. **Transport network reliability measurement and analysis**, Revista Transportes, v. 11, p. 49-62, 2003.

OGDEN, K. W. **Urban goods movement: a guide to policy and planning**. Ashgate Publishing Limited, London, 1992.

OLIVEIRA, E., L. **Indicadores para hierarquização de ligações em rede viária urbana com base em desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Programa de Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

OLIVEIRA, E.; PORTUGAL, L.; PORTO, W. **Determinando links críticos em uma rede viária: indicadores de Vulnerabilidade**. Anpet, 2013.

OLIVEIRA, E.; PORTUGAL, L.; PORTO, W. **Determining critical links in a road network: vulnerability and congestion indicators**. ScienceDirect, Procedia - Social and Behavioral Sciences 162,158 – 167, 2014.

ORTÚZAR, J. de D. e L. G. WILLUMSEN. **Modelling Transport**. 4nd edition John Wiley & Sons, Chichester, England, 2011.

PATTERSON, S. A.; APOSTOLAKIS, G. E. **Identification of critical locations across multiple infrastructures for terrorist actions**. Reliability Engineering and System Safety 92 1183–1203, 2007.

QUAK, H.; DE KOSTER. **Delivering goods in urban areas: how to deal with urban policy restrictions and the environment**. Transportation Science, p. 1-17, 2008.

QIN, X.; IVAN, J. N. E.; RAVISHANKER, N. **Selecting exposure measures in crash rate prediction for two-lane highway segments**. Accident Analysis & Prevention, v. 36, n. 2, p. 183-191, 2004.

SAMED, M; MENDES, J. **Modelagem e desenvolvimento de um problema de localização de uma agroindústria de embutidos no estado do paraná**. Enegep, 2011.

SAMUEL, B. **Probabilidade de nova cheia do Rio Madeira como a última é de 0,45%**. Disponível em: <<http://www.agencia.ac.gov.br/noticias/acre/probabilidade-de-nova-cheia-rio-madeira-como-ultima-e-de-045>>. Acessado em: 21/04/2014 às 17:50:00.

SANCHES J, P. F. **Logística de carga urbana: uma análise da realidade brasileira**. Campinas, SP: UNICAMP, 2008.

SANTOS, A; ZANDONADE, E; CAMPOS, V. **Proposta de um modelo para análise da acessibilidade no transporte de cargas**. XIII Anpet, 2004.

SANTOS, R; LEAL, E. **Solução de um problema de roteirização com janelas de tempo através de um algoritmo de múltiplas colônias de formigas**. Revista Transportes, v. 15, n. 2, p.5-16, 2007.

SCOTT, D. M.; NOVAK, D.C.; AULTMAN-HALL, L.; GUO, F. **Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks**, Journal of Transport Geography, v. 14, n. 3, p. 215-227, 2006.

SOHN, Jungyul. **Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach**. Transportation Research Part A 40 491–506, 2005.

SNELDER, M.; VANZUYLEN, H. J.; IMMERS, L. H. **A framework for robustness analysis of road network for short term variations in supply**, Transportation Research Part A, v. 46, n. 5, p. 828-842, 2012.

SULLIVAN, J.L.; NOVAK, D.C.; AULTMAN-HALL, L.; SCOTT, D.M. **Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: a link-based capacity-reduction approach**. Transportation Research Part A 44, 323–336, 2010.

SUSSMAN, Joseph. **Introduction to transportation system**. Artech house intelligent transportation system library, 2000.

SYAM, S. **A model and methodologies for the location problem with logistical components**. Computers and Operations Research, v. 29, p. 1173-1193, 2002.

TAMPÈRE, C. M. J.; STADA, J.; IMMERS, B. **Methodology for identifying vulnerable sections in a national road network**, disponível em: www.mech.kuleuven.be/cib/verkeer/dwn/pub/P2007C.pdf, 2007.

TATANO, Hirokazu; TSUCHIYA, Satoshi. **A framework for economic loss estimation due to seismic transportation network disruption: a spatial computable general equilibrium approach**. Science+Business Media B.V, 2007.

TAMMINGA, G.F., MATON, J.C., POORTEMAN, R., ZEE, J. De **Robuustheidsscanner – Robuustheid van netwerken: een modelmatige verkenning**. Tech. Rep. I&M-99366053-GT/mk, Grontmij Nederland, i.o.v. Adviesdienst Verkeer & Vervoer, 2005.

TAYLOR, M. A. P.; SEKHAR, S. V. C.; D'ESTE, G. M. **Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks**. Network and Spatial Economics, v. 6, n. 3-4, p. 267-291, 2006.

THEDIM, R., OUROFINO, G., REPOLHO, H. **Roteirização estática com janelas de tempo usando o TransCAD**. Departamento de Engenharia Industrial. PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, ANPET 2014.

TRB. **Transportation Research Board – NCHR Report 365 – Travel Estimation Techniques for Urban Planning**, 1988.

TRIOLA, Mario F. **Introdução à estatística**. 10^o edição. Tradução: Vera Regina Lima de Farias. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

TSAO, J.; LU, C. **A supply chain network design considering transportation cost discounts**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48, pp. 401–414, 2012.

WARDROP J.G. **Some Theoretical Aspect of Road Traffic Research Proceedings**. Institution of Civil Engineering, 1, part 2, 325 – 378, 1952.

VIEIRA, S; REIS, M; SOUSA, M. **Problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos usando metaheurísticas**. Enegep, 2012.

VIVALDINI, Mauro; PIRES, Silvio R.I. **Operadores logísticos: integrando operações em cadeias de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2010.

YANG, H.; LO, H.K.; TANG, W.H. **Travel time *versus* capacity reliability of a road network**. In M.G.H. Bell and C. Cassir (eds.), Reliability of Transport Networks. Research Studies Press, Baldock, Herts. 119-138, 2000.

ANEXO A – DADOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL (C 815)

Cidade	Modelo	Tipo	Valor	Km Rodados	Litros	Km/L	Valor/L	Medição
SÃO PAULO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 276,29	556	115,17	4,83	R\$ 2,40	HODOMETRO
SÃO PAULO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 282,61	702	113,09	6,21	R\$ 2,50	HODOMETRO
SÃO PAULO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 252,50	572	101,04	5,66	R\$ 2,50	HODOMETRO
SÃO PAULO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 100,06	187	40,04	4,67	R\$ 2,50	HODOMETRO
SÃO PAULO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 100,00	187	40,01	4,67	R\$ 2,50	HODOMETRO
SÃO PAULO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 237,01	493	94,84	5,2	R\$ 2,50	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 73,43	202	35	5,77	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 155,25	389	74	5,26	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 104,90	275	50	5,5	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 167,84	463	80	5,79	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 119,59	344	57	6,04	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 174,13	480	83	5,78	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 146,86	336	70	4,8	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 157,35	446	75	5,95	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 136,37	400	65	6,15	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 146,86	358	70	5,11	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 146,86	316	70	4,51	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 90,21	186	43	4,33	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 151,06	359	72	4,99	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 125,88	201	60	3,35	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 207,70	462	99	4,67	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 226,97	402	103	3,9	R\$ 2,20	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 169,94	360	81	4,44	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 125,88	244	60	4,07	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 161,55	381	77	4,95	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 157,35	420	75	5,6	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 98,61	186	47	3,96	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 71,33	135	34	3,97	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 125,88	311	60	5,18	R\$ 2,10	HODOMETRO
TAUBATÉ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 113,29	211	54	3,91	R\$ 2,10	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 205,12	448	82,08	5,46	R\$ 2,50	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 262,00	581	104,84	5,54	R\$ 2,50	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 155,00	302	58,49	5,16	R\$ 2,65	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 292,00	685	112,45	6,09	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 223,02	454	85,81	5,29	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 266,00	555	102,35	5,42	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 102,00	221	39,25	5,63	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 304,01	660	116,97	5,64	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 300,00	715	115,45	6,19	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 167,00	335	64,26	5,21	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 311,83	657	119,98	5,48	R\$ 2,60	HODOMETRO
ANÁPOLIS	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 270,01	567	103,89	5,46	R\$ 2,60	HODOMETRO
CRATO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 357,65	552	133,45	4,14	R\$ 2,68	HODOMETRO

Cidade	Modelo	Tipo	Valor	Km Rodados	Litros	Km/L	Valor/L	Medição
CRATO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 186,39	385	69,55	5,54	R\$ 2,68	HODOMETRO
CRATO	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 223,75	400	83,49	4,79	R\$ 2,68	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 264,48	568	114	4,98	R\$ 2,32	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 257,66	553	110	5,03	R\$ 2,34	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 258,27	509	106	4,8	R\$ 2,44	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 265,58	546	109	5,01	R\$ 2,44	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 280,04	577	114	5,06	R\$ 2,46	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 289,87	582	118	4,93	R\$ 2,46	HODOMETRO
FORTALEZA	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 280,04	564	114	4,95	R\$ 2,46	HODOMETRO
IMPERATRIZ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 301,63	686	114,73	5,98	R\$ 2,63	HODOMETRO
MACEIÓ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 360,66	387	138,76	2,79	R\$ 2,60	HODOMETRO
MACEIÓ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 283,90	490	114,94	4,26	R\$ 2,47	HODOMETRO
MACEIÓ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 336,75	407	130,03	3,13	R\$ 2,59	HODOMETRO
MACEIÓ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 308,50	471	118,7	3,97	R\$ 2,60	HODOMETRO
MACEIÓ	FORD C 815 2004	DIESEL	R\$ 303,29	480	117,1	4,1	R\$ 2,59	HODOMETRO

ANEXO B – TABELA DE ATRIBUTOS DO ARCO (*STATUS QUO*)

<i>Arco</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	60	60	60	60	60	40	40	40	40	40
Capacidade (vph)	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250
Carregamento (vph)	4.764	4.817	4.817	5.251	4.764	3.433	3.840	3.007	1.300	1.300
Tempo carreg. (seg)	9,43	9,55	9,55	10,69	9,43	15,59	18,66	13,36	11,95	11,95
Tempo F. livre (seg)	6,78	6,78	6,78	6,78	6,78	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17
Velocidade carreg. (km/h)	43	43	43	38	43	26	22	30	34	34

<i>Arco</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Capacidade (vph)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250
Carregamento (vph)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	3.433	4.159	3.007	1.300	1.300
Tempo carreg. (seg)	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	15,59	21,85	13,36	11,95	11,95
Tempo F. livre (seg)	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17
Velocidade carreg. (km/h)	35	35	35	35	35	26	19	30	34	34

<i>Arco</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>	<i>24</i>	<i>25</i>	<i>26</i>	<i>27</i>	<i>28</i>	<i>29</i>	<i>30</i>	<i>31</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	60
Capacidade (vph)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250	3.750
Carregamento (vph)	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600	3.433	3.460	3.007	1.300	1.300	3.873
Tempo carreg. (seg)	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	15,59	15,77	13,36	11,95	11,95	7,94
Tempo F. livre (seg)	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	6,78
Velocidade carreg. (km/h)	34	34	34	34	34	26	26	30	34	34	51

<i>Arco</i>	<i>32</i>	<i>33</i>	<i>34</i>	<i>35</i>	<i>36</i>	<i>37</i>	<i>38</i>	<i>39</i>	<i>40</i>	<i>41</i>	<i>42</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	60	60	60	60	40	40	40	40	40	40	40
Capacidade (vph)	3.750	3.750	3.750	3.750	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250	2.500	2.500
Carregamento (vph)	3.407	3.029	3.030	3.308	3.796	3.460	3.007	1.300	1.300	3.766	5.427
Tempo carreg. (seg)	7,47	7,21	7,21	7,40	18,28	15,77	13,36	11,95	11,95	18,03	44,05
Tempo F. livre (seg)	6,78	6,78	6,78	6,78	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17
Velocidade carreg. (km/h)	54	56	56	55	22	26	30	34	34	23	9

<i>Arco</i>	<i>43</i>	<i>44</i>	<i>45</i>	<i>46</i>	<i>47</i>	<i>48</i>	<i>49</i>	<i>50</i>	<i>51</i>	<i>52</i>	<i>53</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Capacidade (vph)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250	2.500	2.500	2.500
Carregamento (vph)	4.244	4.244	4.308	3.180	4.908	3.007	1.300	1.300	4.191	4.903	3.696
Tempo carreg. (seg)	22,84	22,84	23,62	14,16	32,83	13,36	11,95	11,95	22,22	32,74	17,46
Tempo F. livre (seg)	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17
Velocidade carreg. (km/h)	18	18	17	29	12	30	34	34	18	12	23

<i>Arco</i>	<i>54</i>	<i>55</i>	<i>56</i>	<i>57</i>	<i>58</i>	<i>59</i>	<i>60</i>	<i>61</i>	<i>62</i>	<i>63</i>	<i>64</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Capacidade (vph)	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250	2.500	2.500	2.500	2.500
Carregamento (vph)	3.696	5.025	3.224	2.610	3.007	1.300	1.300	2.600	2.600	2.600	2.600
Tempo carreg. (seg)	17,46	35,07	14,39	11,98	13,36	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95
Tempo F. livre (seg)	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17
Velocidade carreg. (km/h)	23	12	28	34	30	34	34	34	34	34	34

<i>Arco</i>	<i>65</i>	<i>66</i>	<i>67</i>	<i>68</i>	<i>69</i>	<i>70</i>	<i>71</i>	<i>72</i>	<i>73</i>	<i>74</i>
Comprimento (m)	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Velocidade F. livre (km/h)	40	40	40	40	40	60	60	60	60	60
Capacidade (vph)	2.500	2.500	2.500	1.250	1.250	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
Carregamento (vph)	4.105	4.428	3.007	1.300	1.300	5.768	5.688	4.130	4.500	5.177
Tempo carreg. (seg)	21,26	25,18	13,36	11,95	11,95	35,60	34,03	14,35	17,46	25,48
Tempo F. livre (seg)	10,17	10,17	10,17	10,17	10,17	6,78	6,78	6,78	6,78	6,78
Velocidade carreg. (km/h)	19	16	30	34	34	11	12	28	23	16

ANEXO C – DADOS DE MANUTENÇÃO (C 815)

Peça	Total
OLEO CAMBIO/DIFERENCIAL MOBILUBE 1SHC-BD20LTS	R\$ 935,00
OLEO DIFERENCIAL MOBILUBE HD 85W140	R\$ 103,00
OLEO MOBIL DELVAC 1400 SUPER SAE 15W/40 BALDE C/20 LTS	R\$ 207,20
OLEO MOBILUBE HDA 85W90	R\$ 49,60
OLEO MOTOR MOBIL DELVAC MX CI-4 15W40	R\$ 135,00
MP1 FORD C815 CUMMINS 01>04 15000KM Total	R\$ 1.429,80
PNEU NOVO TL-S/CAMARA URBANO 215/75 RAD-12L ARO:17,5 POSICAO MONTAGEM:EIXO DIREC	R\$ 1.660,00
MP1 FORD C815E CUMMINS 06>07 20000KM Total	R\$ 1.660,00
Total Geral	R\$ 3.089,80

ANEXO D – MÉTODO DO OBSERVADOR MÓVEL

CONTAGEM - MÉTODO DO OBSERVADOR MÓVEL

Logradouro:

Data:

Início do trecho:

Fim do trecho:

Condições do Tempo:

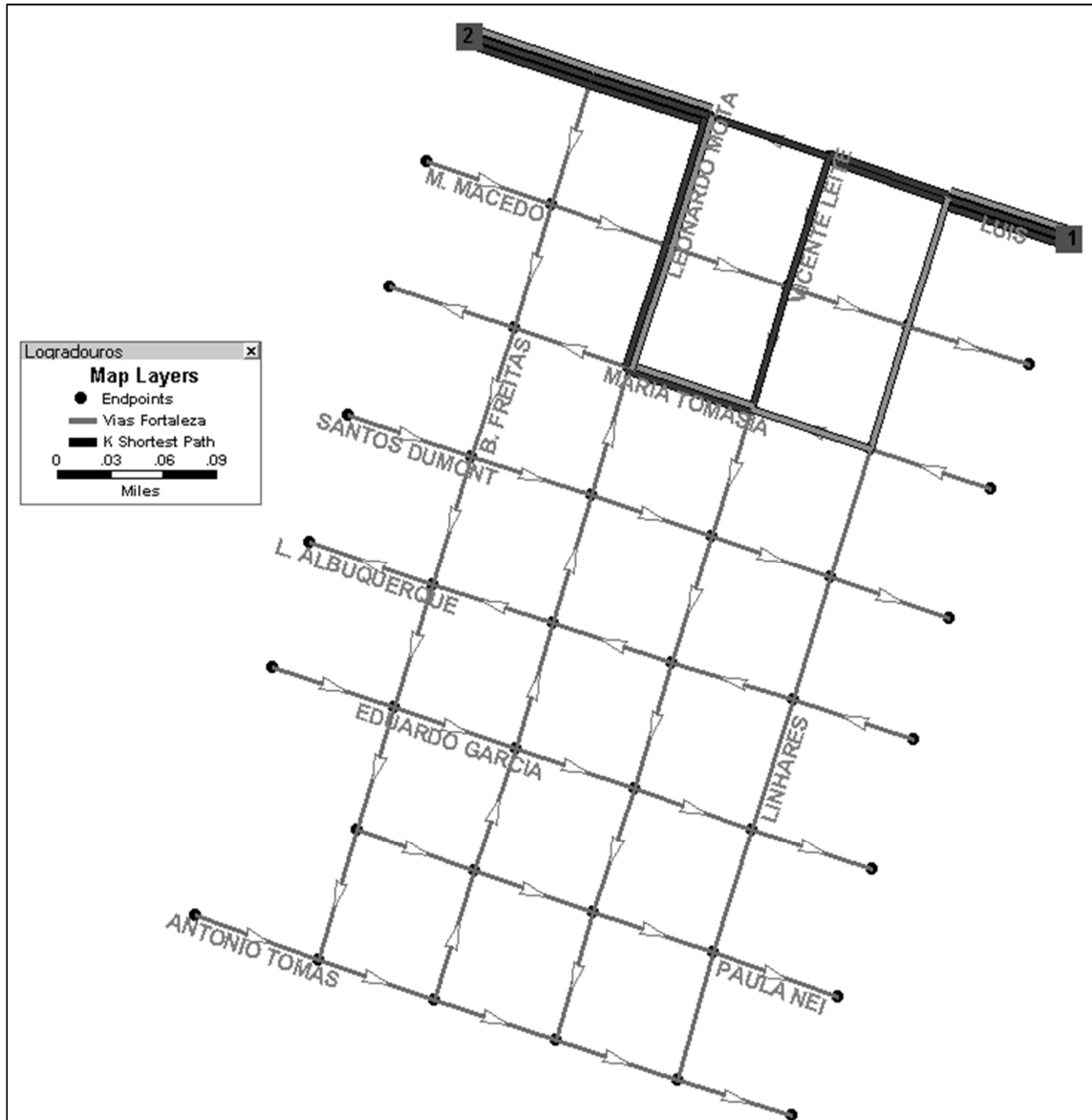
Sentido	Viagem	Tempo de viagem t (minutos)	Shopping	Lojas	Indústrias
T_n					

Lesto - Oeste	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
	6	
	7	
	8	
	9	
	10	

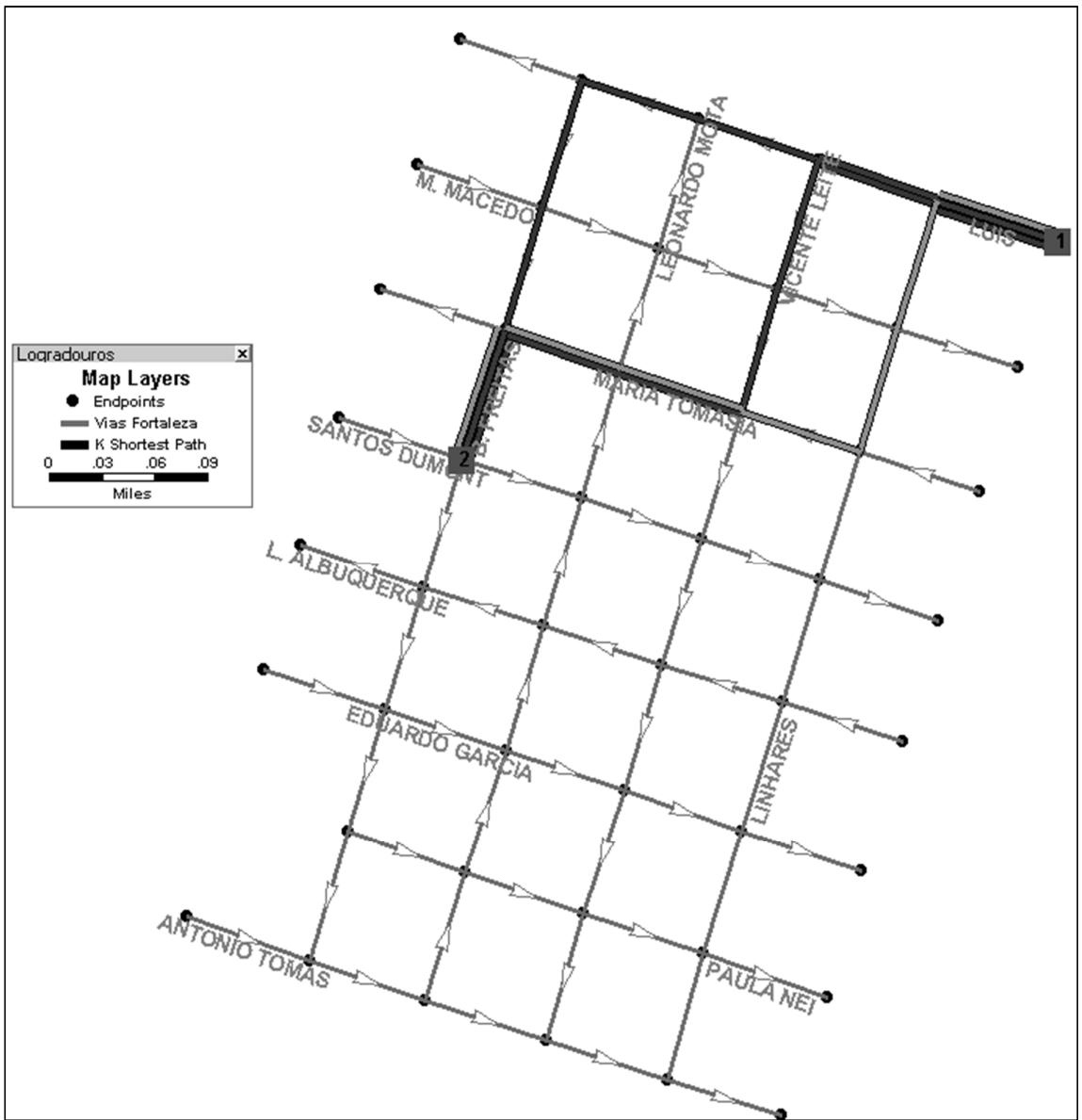
Total	
Média	
Variância	
Desvio P.	

ANEXO E – ROTAS MÍNIMAS PELO TRANSCAD 4.5 (DIJKSTRA)

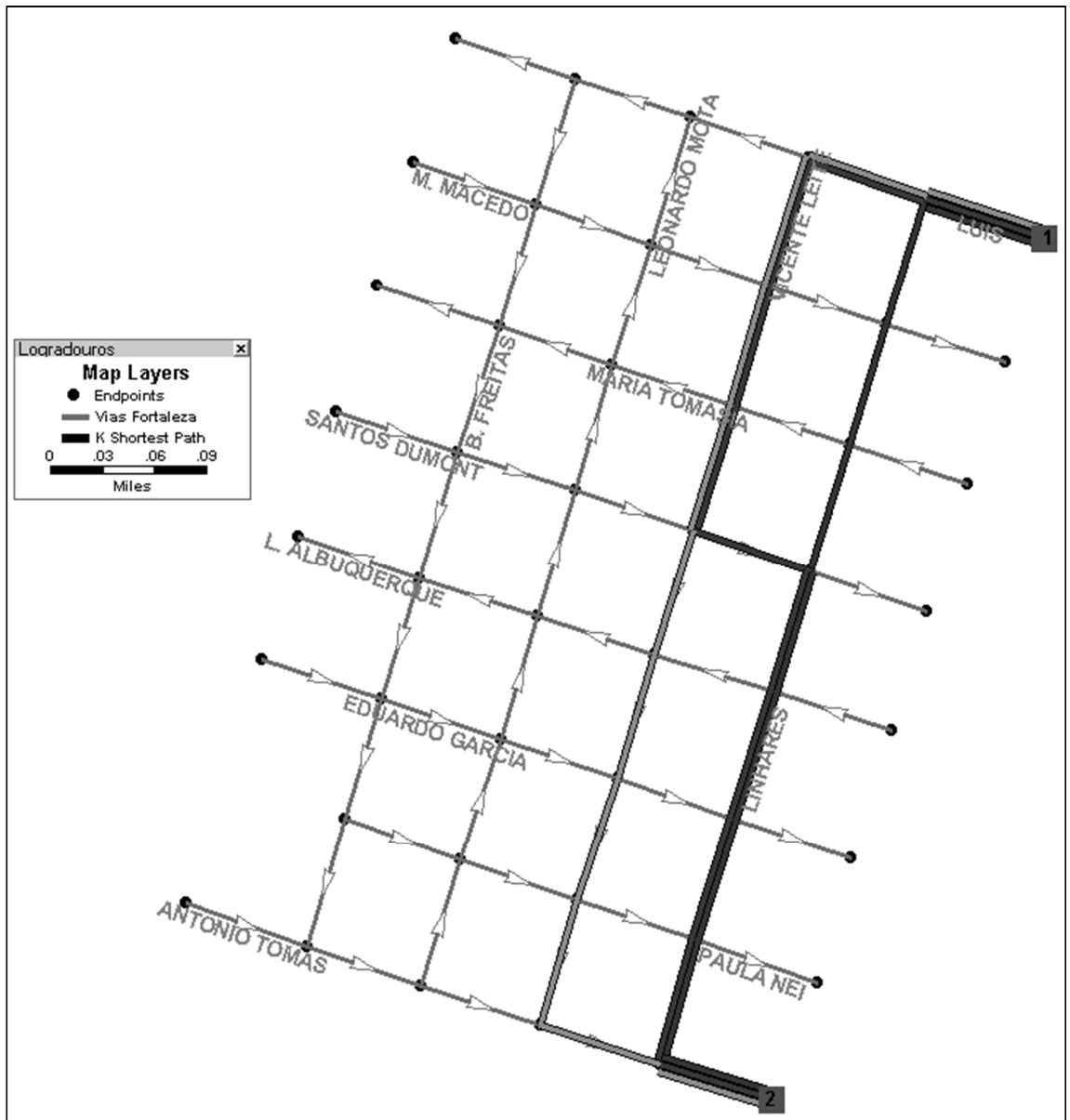
(i) 06-01



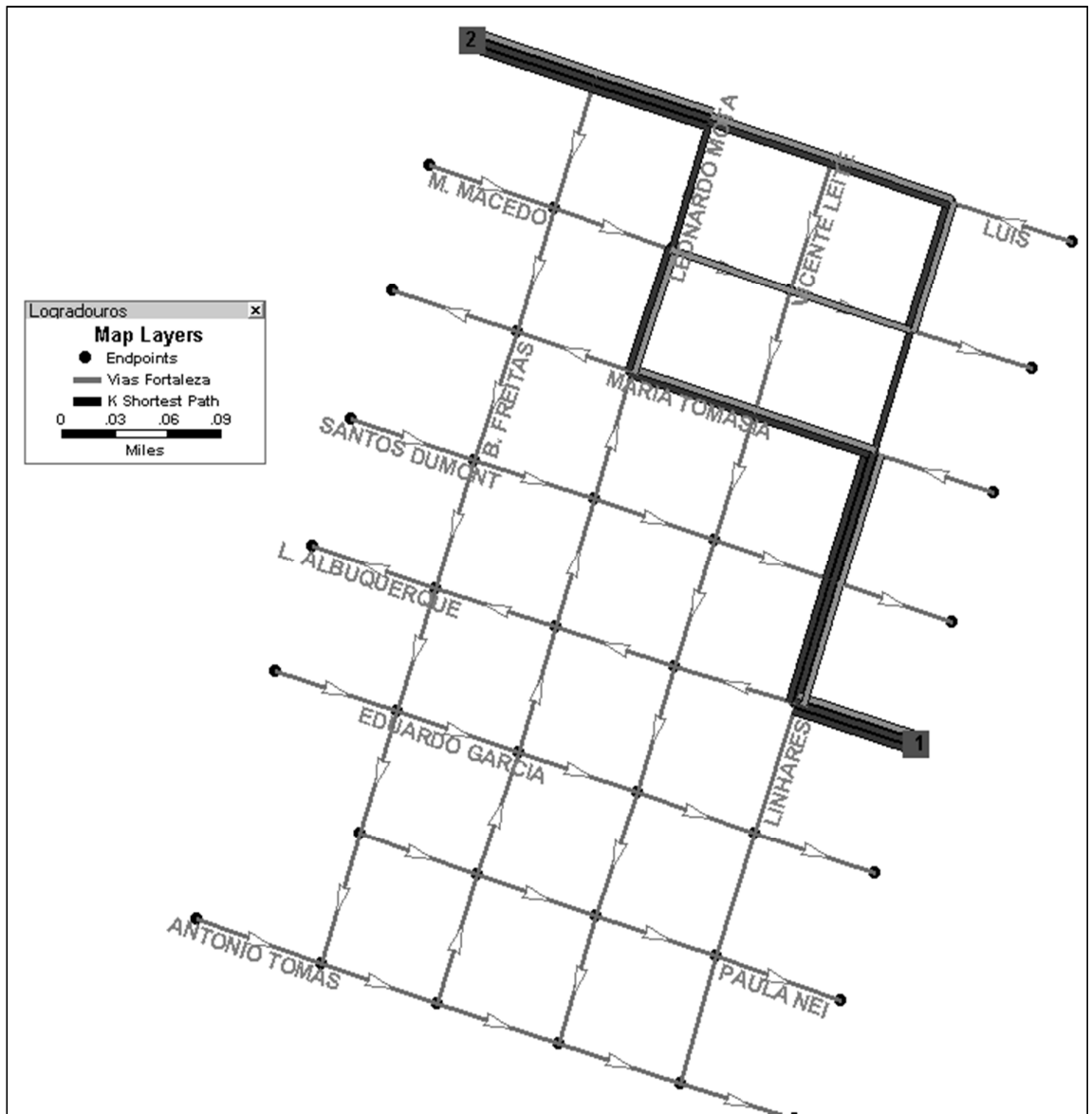
(ii) 06-20



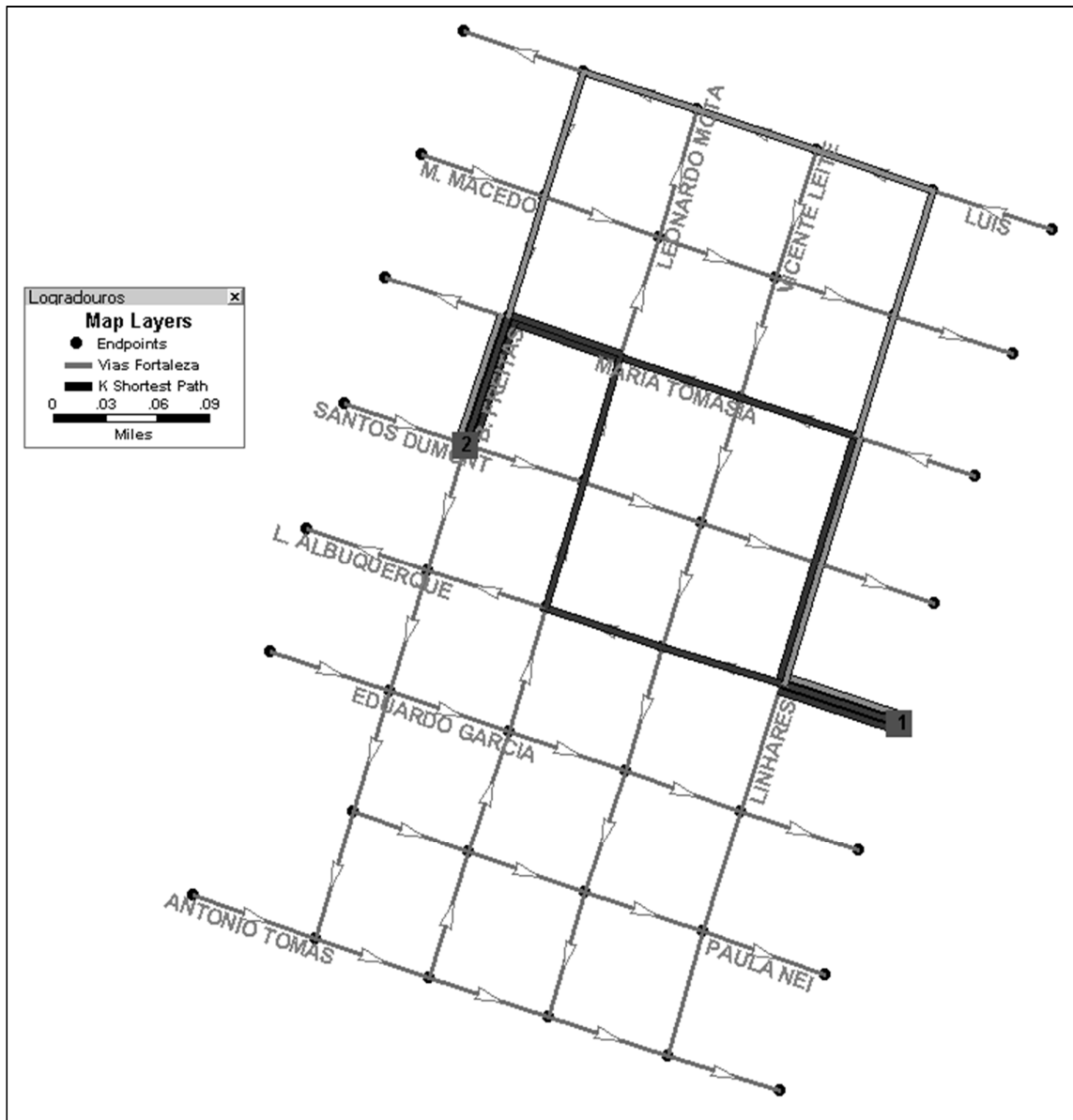
(iii) 06-47



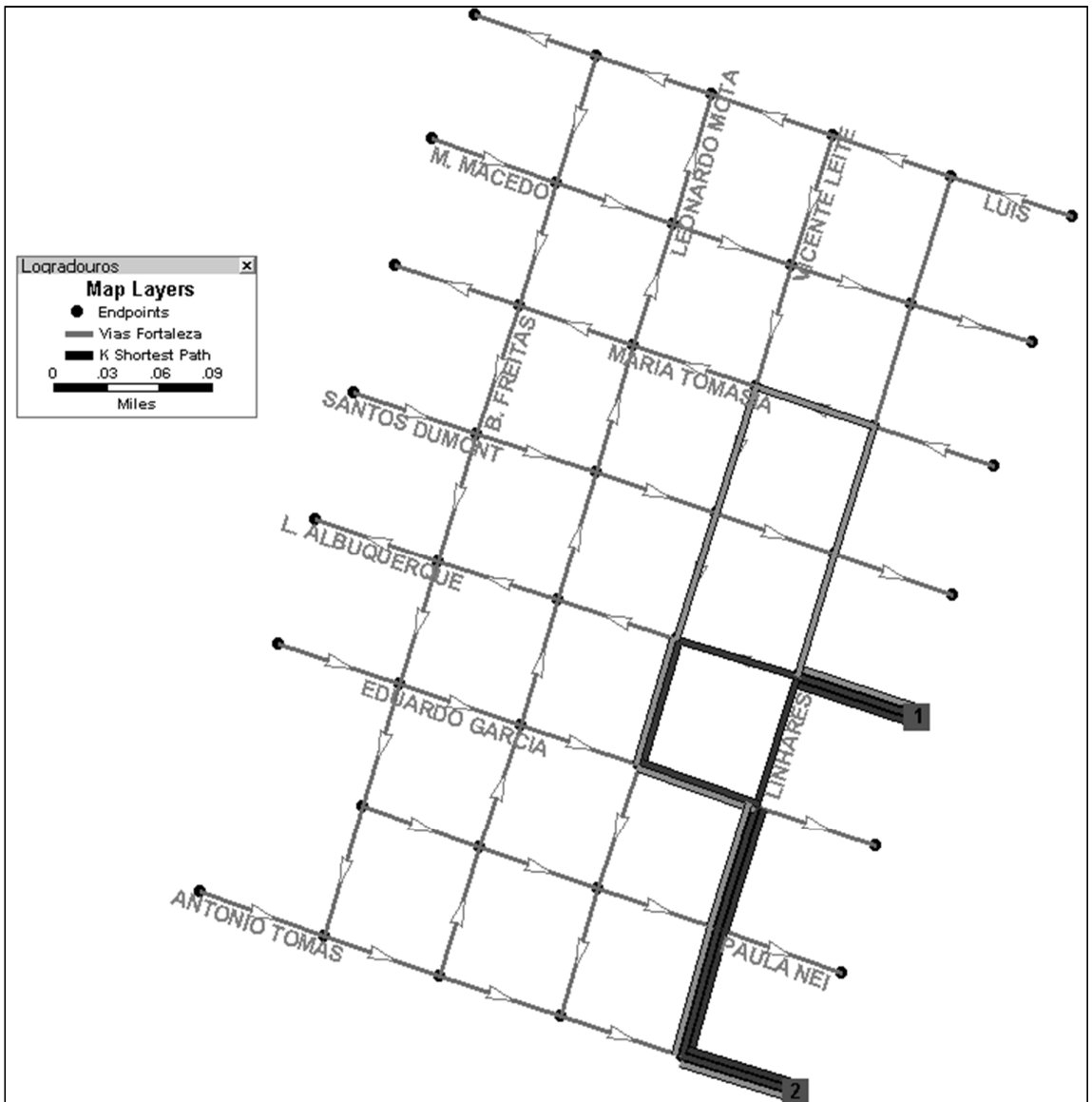
(iv) 30-01



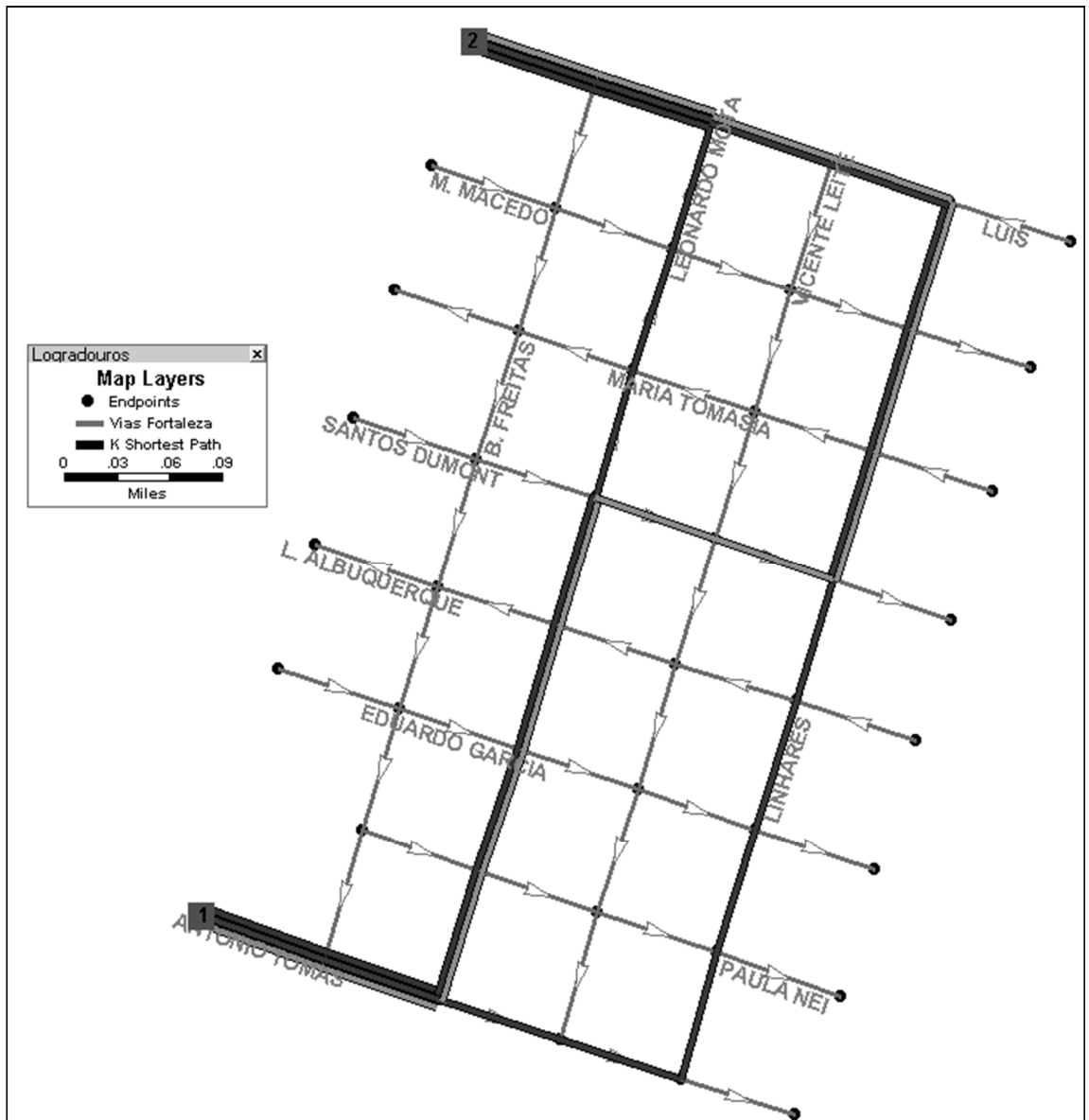
(v) 30-20



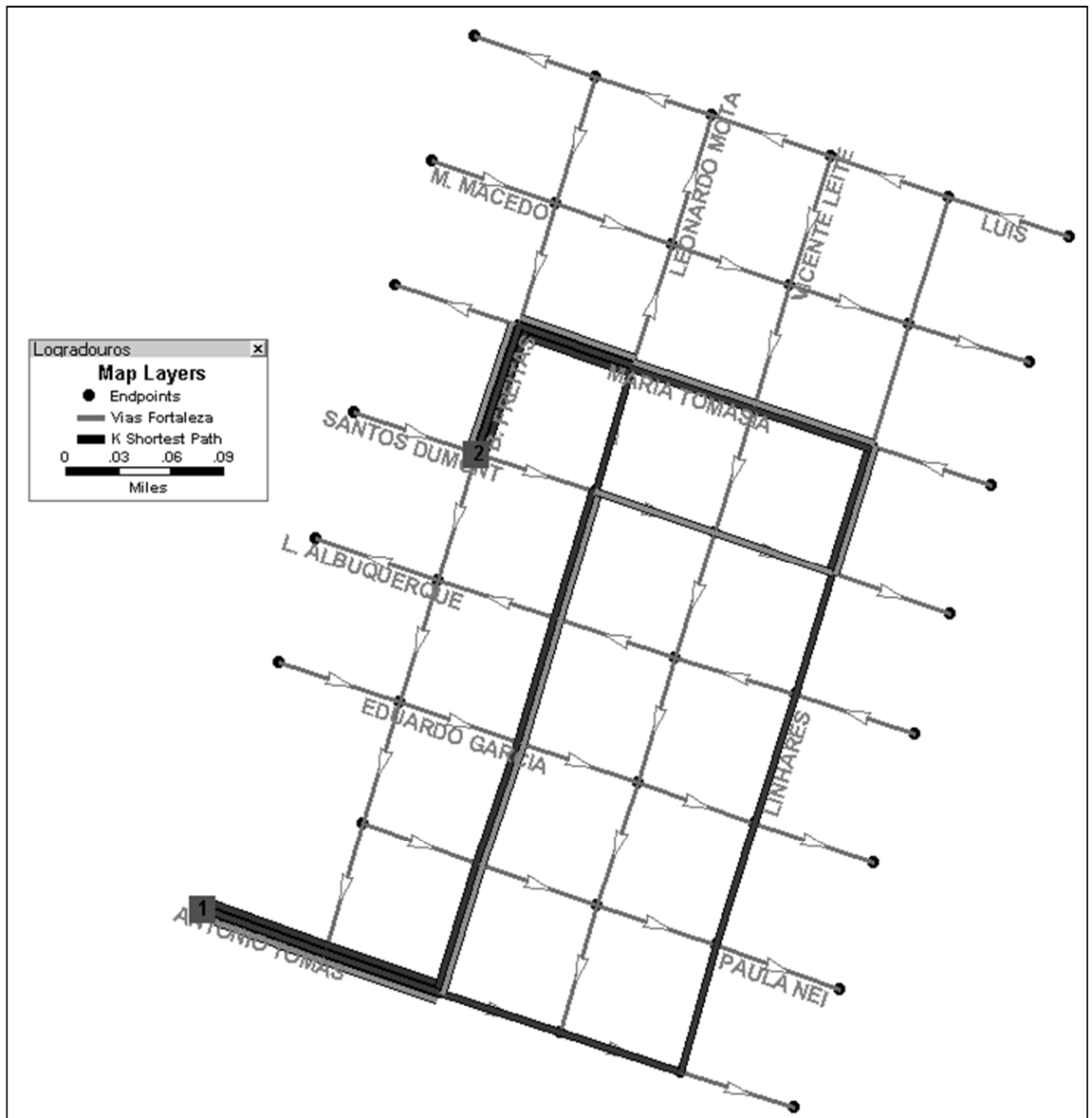
(vi) 30-47



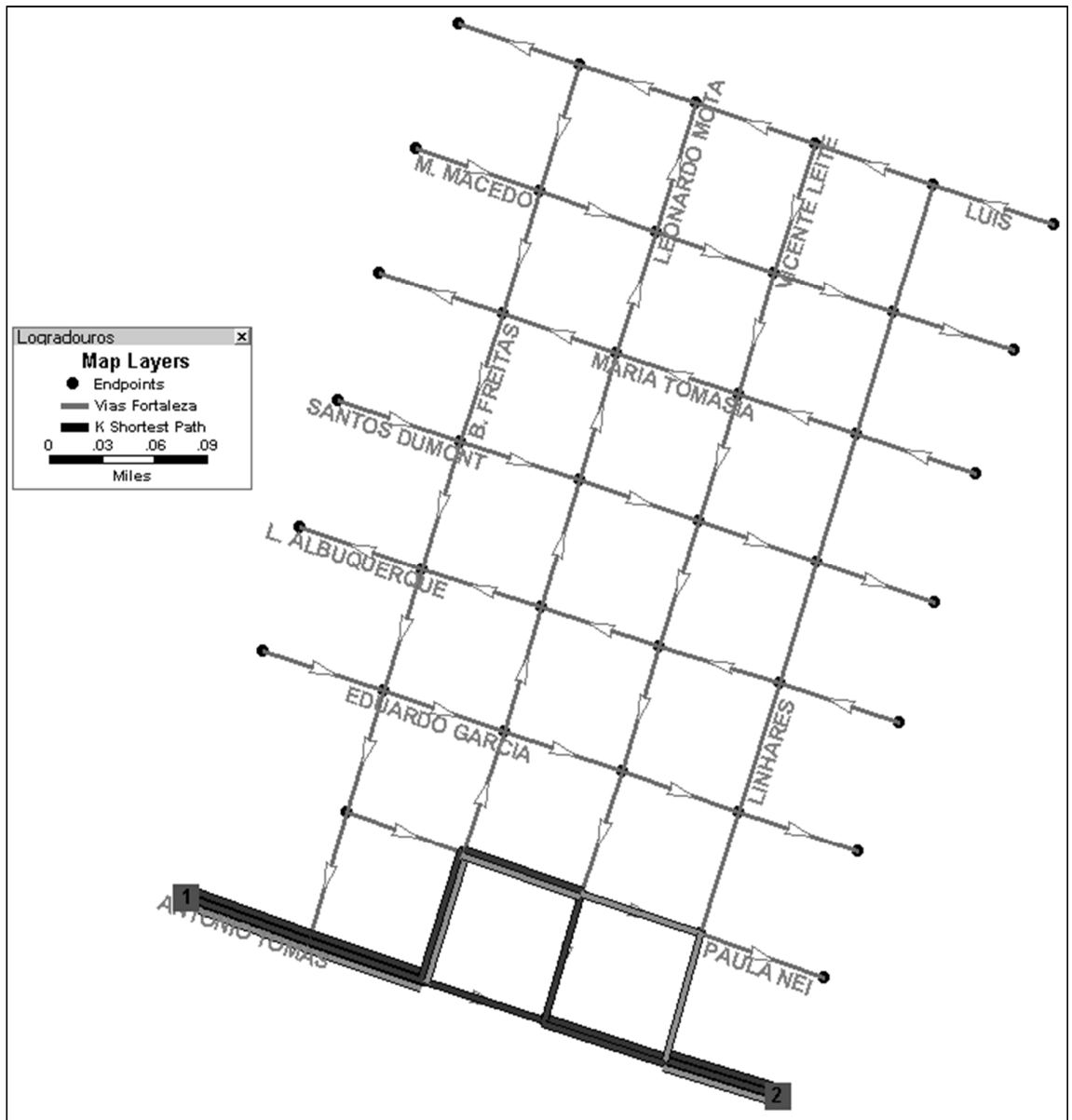
(vii) 42-01



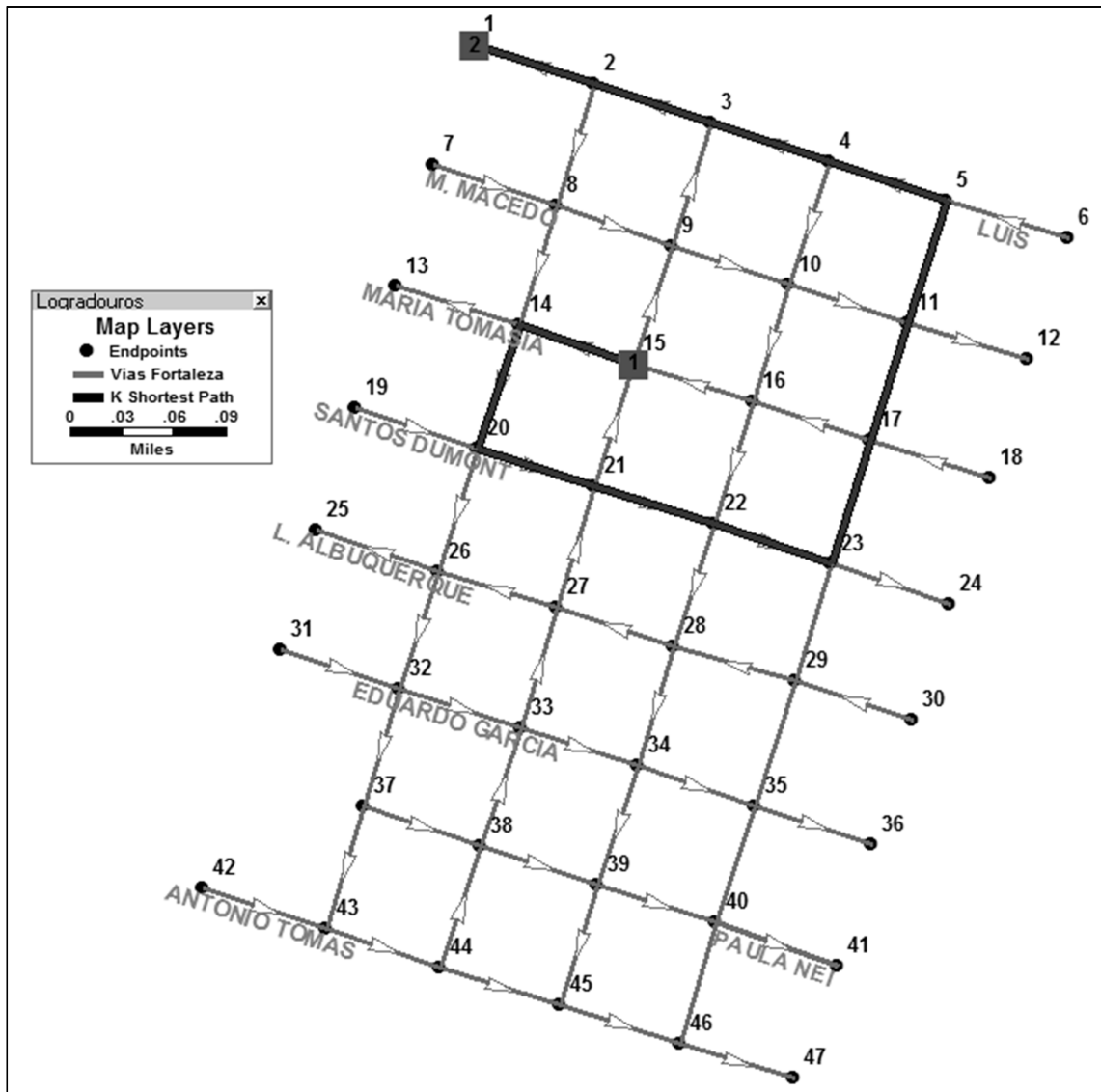
(viii) 42-20



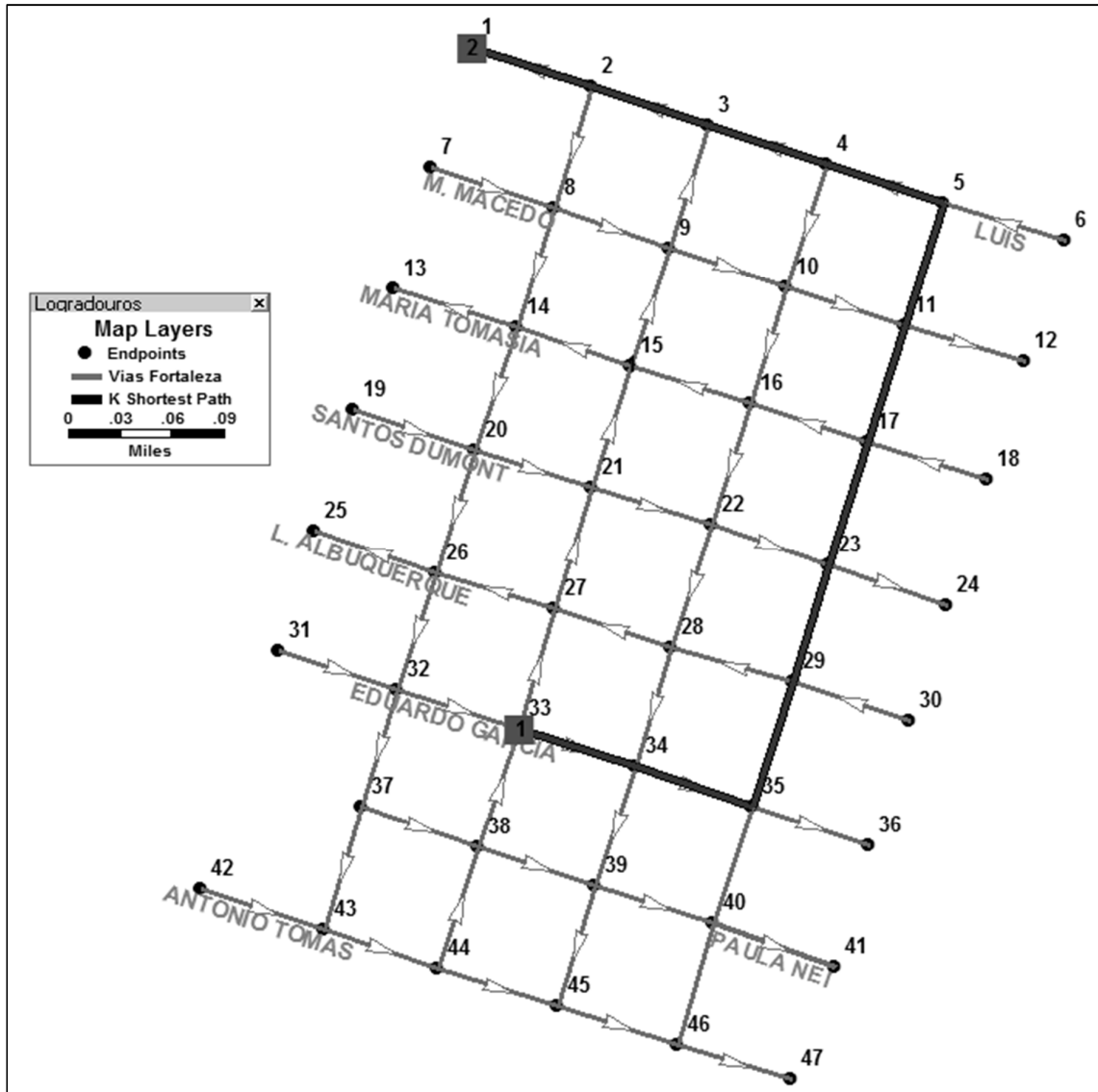
(ix) 42-47



(x) 42-01 (Re-roteamento após falha no Arco 17)



(xi) 42-01 (Re-roteamento após falha no Arco 47)



ANEXO F – MEDIÇÃO PELO MÉTODO DAS PLACAS NA AV. DOM LUÍS

ID	Dia	Hora 1	Faixa	V. Max	V. Medida	Tamanho	Metros	Hora 2	Delta T.	Minutos
1	08/10/2014	08:00:33	4	67	37.0	9.8	0	08:04:43	00:04:10	4,17
2	08/10/2014	08:01:31	4	67	36.0	7.5	0	08:04:48	00:03:17	3,28
3	08/10/2014	08:01:33	4	67	35.0	10.8	0	08:04:36	00:03:03	3,05
4	08/10/2014	08:03:34	4	67	26.0	10.0	0	08:07:24	00:03:50	3,83
5	08/10/2014	08:09:06	4	67	44.0	9.7	0	08:12:44	00:03:38	3,63
6	08/10/2014	08:09:56	4	67	13.0	7.3	0	08:13:19	00:03:23	3,38
7	08/10/2014	08:11:48	4	67	0.0	0.0	0	08:14:40	00:02:52	2,87
8	08/10/2014	08:12:14	4	67	28.0	10.1	0	08:15:41	00:03:27	3,45
9	08/10/2014	08:14:37	4	67	36.0	10.4	0	08:19:12	00:04:35	4,58
10	08/10/2014	08:18:40	4	67	23.0	10.4	0	08:22:09	00:03:29	3,48
11	08/10/2014	08:19:48	4	67	38.0	10.5	0	08:23:38	00:03:50	3,83
12	08/10/2014	08:20:45	4	67	20.0	10.1	0	08:24:20	00:03:35	3,58
13	08/10/2014	08:21:52	4	67	37.0	10.5	0	08:26:02	00:04:10	4,17
14	08/10/2014	08:22:54	4	67	19.0	9.7	0	08:27:38	00:04:44	4,73
15	08/10/2014	08:25:19	4	67	25.0	3.9	0	08:28:00	00:02:41	2,68
16	08/10/2014	08:27:06	4	67	31.0	9.8	0	08:30:39	00:03:33	3,55
17	08/10/2014	08:29:39	4	67	31.0	9.9	0	08:33:11	00:03:32	3,53
18	08/10/2014	08:31:41	4	67	50.0	10.1	0	08:35:14	00:03:33	3,55
19	08/10/2014	08:33:56	4	67	35.0	10.3	0	08:37:07	00:03:11	3,18
20	08/10/2014	08:35:45	4	67	15.0	10.3	0	08:38:30	00:02:45	2,75
21	08/10/2014	08:35:55	4	67	31.0	10.3	0	08:38:54	00:02:59	2,98
22	08/10/2014	08:37:57	4	67	15.0	3.3	0	08:40:22	00:02:25	2,42
23	08/10/2014	08:42:20	4	67	0.0	0.0	0	08:45:33	00:03:13	3,22
24	08/10/2014	08:43:21	4	67	26.0	10.0	0	08:47:11	00:03:50	3,83
25	08/10/2014	08:49:34	4	67	26.0	10.2	0	08:53:27	00:03:53	3,88
26	08/10/2014	08:52:35	4	67	15.0	7.0	0	08:55:33	00:02:58	2,97
27	08/10/2014	08:53:25	4	67	33.0	9.8	0	08:56:43	00:03:18	3,30
28	08/10/2014	08:55:12	4	67	15.0	9.8	0	08:58:59	00:03:47	3,78

ANEXO G – MEDIÇÃO PELO MÉTODO DAS PLACAS NA AV. SANTOS DUMONT

ID	Dia	Hora 1	Faixa	V. Max	V. Medida	Tamanho	Metros	Hora 2	Delta T.	Minutos
1	01/10/2014	08:02:56	4	67	23.0	3.3	0	08:03:40	00:00:44	0,73
2	01/10/2014	08:07:45	3	67	30.0	2.8	0	08:08:32	00:00:47	0,78
3	01/10/2014	08:07:45	2	67	37.0	2.8	0	08:08:31	00:00:46	0,77
4	01/10/2014	08:09:36	4	67	0.0	6.6	0	08:10:40	00:01:04	1,07
5	01/10/2014	08:14:05	3	67	27.0	3.6	0	08:14:50	00:00:45	0,75
6	01/10/2014	08:15:52	3	67	27.0	3.4	0	08:16:36	00:00:44	0,73
7	01/10/2014	08:18:31	4	67	35.0	3.2	0	08:19:20	00:00:49	0,82
8	01/10/2014	08:18:34	3	67	43.0	9.3	0	08:20:43	00:02:09	2,15
9	01/10/2014	08:20:49	3	67	33.0	2.9	0	08:23:38	00:02:49	2,82
10	01/10/2014	08:24:55	3	67	52.0	0.7	0	08:27:06	00:02:11	2,18
11	01/10/2014	08:24:55	4	67	52.0	8.8	0	08:27:06	00:02:11	2,18
12	01/10/2014	08:26:42	4	67	24.0	8.7	0	08:27:57	00:01:15	1,25
13	01/10/2014	08:28:49	3	67	24.0	3.4	0	08:29:32	00:00:43	0,72
14	01/10/2014	08:28:52	3	67	26.0	9.2	0	08:31:16	00:02:24	2,40
15	01/10/2014	08:29:21	3	67	39.0	3.0	0	08:31:27	00:02:06	2,10
16	01/10/2014	08:29:29	3	67	0.0	5.6	0	08:31:36	00:02:07	2,12
17	01/10/2014	08:31:02	4	67	25.0	8.7	0	08:32:13	00:01:11	1,18
18	01/10/2014	08:31:24	4	67	0.0	9.0	0	08:33:36	00:02:12	2,20
19	01/10/2014	08:31:28	2	67	52.0	2.7	0	08:32:04	00:00:36	0,60
20	01/10/2014	08:33:09	3	67	24.0	3.4	0	08:33:59	00:00:50	0,83
21	01/10/2014	08:35:19	3	67	23.0	3.5	0	08:36:03	00:00:44	0,73
22	01/10/2014	08:43:55	3	67	22.0	3.4	0	08:44:39	00:00:44	0,73
23	01/10/2014	08:43:55	2	67	30.0	3.5	0	08:44:39	00:00:44	0,73
24	01/10/2014	08:48:28	4	67	30.0	3.2	0	08:49:20	00:00:52	0,87
25	01/10/2014	08:52:35	3	67	27.0	3.0	0	08:53:25	00:00:50	0,83
26	01/10/2014	08:57:30	3	67	51.0	3.2	0	08:59:27	00:01:57	1,95
27	01/10/2014	08:59:04	3	67	32.0	3.9	0	08:59:46	00:00:42	0,70

ANEXO H – DADOS DE VOLUME E CUSTOS DOS ARCOS (*STATUS QUO*)

Arco	Vol. Obs Quo	Volume Obs (carga)	Vol. Obs Total	Percorridos (km)	Litros	Custo Comb.	Custo Pneu	Custo Lub.	Custo Total
1	4.764	54	4.818	6	1	R\$ 2,89	R\$ 0,37	R\$ 0,12	R\$ 3,39
2	4.817	67	4.884	8	2	R\$ 3,57	R\$ 0,46	R\$ 0,15	R\$ 4,18
3	4.817	37	4.854	4	1	R\$ 1,99	R\$ 0,26	R\$ 0,09	R\$ 2,33
4	5.251	54	5.305	6	1	R\$ 2,90	R\$ 0,37	R\$ 0,13	R\$ 3,40
5	4.764	46	4.810	5	1	R\$ 2,46	R\$ 0,32	R\$ 0,11	R\$ 2,88
6	3.433	13	3.446	1	0	R\$ 0,68	R\$ 0,09	R\$ 0,03	R\$ 0,80
7	3.840	30	3.870	3	1	R\$ 1,58	R\$ 0,20	R\$ 0,07	R\$ 1,85
8	3.007	17	3.024	2	0	R\$ 0,92	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,08
9	1.300	0	1.300	0	0	R\$ 0,01	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,01
10	1.300	8	1.308	1	0	R\$ 0,45	R\$ 0,06	R\$ 0,02	R\$ 0,53
11	2.500	0	2.500	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
12	2.500	0	2.500	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
13	2.500	0	2.500	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
14	2.500	0	2.500	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
15	2.500	0	2.500	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
16	3.433	13	3.446	1	0	R\$ 0,68	R\$ 0,09	R\$ 0,03	R\$ 0,80
17	4.159	30	4.189	3	1	R\$ 1,58	R\$ 0,20	R\$ 0,07	R\$ 1,85
18	3.007	17	3.024	2	0	R\$ 0,92	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,08
19	1.300	0	1.300	0	0	R\$ 0,01	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,01
20	1.300	8	1.308	1	0	R\$ 0,45	R\$ 0,06	R\$ 0,02	R\$ 0,53
21	2.600	0	2.600	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
22	2.600	42	2.642	5	1	R\$ 2,26	R\$ 0,29	R\$ 0,10	R\$ 2,65
23	2.600	15	2.615	2	0	R\$ 0,79	R\$ 0,10	R\$ 0,03	R\$ 0,93
24	2.600	15	2.615	2	0	R\$ 0,79	R\$ 0,10	R\$ 0,03	R\$ 0,92
25	2.600	0	2.600	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
26	3.433	55	3.488	6	1	R\$ 2,94	R\$ 0,38	R\$ 0,13	R\$ 3,45
27	3.460	57	3.517	6	1	R\$ 3,05	R\$ 0,39	R\$ 0,13	R\$ 3,57
28	3.007	17	3.024	2	0	R\$ 0,91	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,07
29	1.300	0	1.300	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
30	1.300	23	1.323	3	1	R\$ 1,23	R\$ 0,16	R\$ 0,05	R\$ 1,44
31	3.873	0	3.873	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
32	3.407	0	3.407	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
33	3.029	0	3.029	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
34	3.030	0	3.030	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
35	3.308	0	3.308	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
36	3.796	55	3.851	6	1	R\$ 2,94	R\$ 0,38	R\$ 0,13	R\$ 3,45
37	3.460	57	3.517	6	1	R\$ 3,05	R\$ 0,39	R\$ 0,13	R\$ 3,57
38	3.007	17	3.024	2	0	R\$ 0,91	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,07
39	1.300	0	1.300	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
40	1.300	23	1.323	3	1	R\$ 1,23	R\$ 0,16	R\$ 0,05	R\$ 1,44
41	3.766	0	3.766	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
42	5.427	0	5.427	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
43	4.244	20	4.264	2	0	R\$ 1,07	R\$ 0,14	R\$ 0,05	R\$ 1,25
44	4.244	25	4.269	3	1	R\$ 1,35	R\$ 0,18	R\$ 0,06	R\$ 1,59
45	4.308	61	4.369	7	1	R\$ 3,26	R\$ 0,42	R\$ 0,14	R\$ 3,82
46	3.180	0	3.180	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
47	4.908	37	4.945	4	1	R\$ 1,98	R\$ 0,26	R\$ 0,09	R\$ 2,32
48	3.007	22	3.029	3	1	R\$ 1,19	R\$ 0,15	R\$ 0,05	R\$ 1,40
49	1.300	13	1.313	1	0	R\$ 0,68	R\$ 0,09	R\$ 0,03	R\$ 0,79
50	1.300	0	1.300	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
51	4.191	0	4.191	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
52	4.903	0	4.903	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
53	3.696	0	3.696	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -

54	3.696	5	3.701	1	0	R\$ 0,29	R\$ 0,04	R\$ 0,01	R\$ 0,33
55	5.025	0	5.025	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
56	3.224	0	3.224	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
57	2.610	37	2.647	4	1	R\$ 1,98	R\$ 0,26	R\$ 0,09	R\$ 2,32
58	3.007	17	3.024	2	0	R\$ 0,91	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,07
59	1.300	18	1.318	2	0	R\$ 0,96	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,13
60	1.300	0	1.300	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
61	2.600	0	2.600	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
62	2.600	0	2.600	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
63	2.600	0	2.600	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
64	2.600	0	2.600	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
65	4.105	0	4.105	0	0	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
66	4.428	37	4.465	4	1	R\$ 1,98	R\$ 0,26	R\$ 0,09	R\$ 2,32
67	3.007	17	3.024	2	0	R\$ 0,91	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,07
68	1.300	18	1.318	2	0	R\$ 0,96	R\$ 0,12	R\$ 0,04	R\$ 1,13
69	1.300	0	1.300	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
70	5.768	53	5.821	6	1	R\$ 2,83	R\$ 0,37	R\$ 0,12	R\$ 3,32
71	5.688	53	5.741	6	1	R\$ 2,83	R\$ 0,37	R\$ 0,12	R\$ 3,32
72	4.130	16	4.146	2	0	R\$ 0,86	R\$ 0,11	R\$ 0,04	R\$ 1,00
73	4.500	33	4.533	4	1	R\$ 1,76	R\$ 0,23	R\$ 0,08	R\$ 2,07
74	5.177	51	5.228	6	1	R\$ 2,73	R\$ 0,35	R\$ 0,12	R\$ 3,20
S	236.441	1.304	237.745	34	7	R\$ 16,06	R\$ 9,00	R\$ 3,01	R\$ 28,08

ANEXO I – DADOS DE CONFIABILIDADE E RISCO DOS ARCOS (*STATUS QUO*)

Arco	T arco (seg)	Velocidade (km/h)	Variância	D. Padrão	Confiabilidade	Vol. cod	Vel. cod	VR	Risco
1	9,43	43 km/h	0,30	0,54	Médio	0,78	0,72	23,41	Médio
2	9,55	43 km/h	0,30	0,54	Médio	0,79	0,71	23,79	Médio
3	9,55	43 km/h	0,30	0,54	Médio	0,79	0,71	23,67	Médio
4	10,69	38 km/h	0,30	0,54	Médio	0,89	0,61	26,68	Alto
5	9,43	43 km/h	0,30	0,54	Médio	0,78	0,72	23,38	Médio
6	15,59	26 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,47	0,36	21,70	Médio
7	18,66	22 km/h	0,25	0,50	Médio	0,57	0,27	24,28	Médio
8	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,39	Médio
9	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
10	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,99	Baixo
11	11,70	35 km/h	0,12	0,35	Baixo	0,27	0,54	17,03	Baixo
12	11,70	35 km/h	0,12	0,35	Baixo	0,27	0,54	17,03	Baixo
13	11,70	35 km/h	0,12	0,35	Baixo	0,27	0,54	17,03	Baixo
14	11,70	35 km/h	0,12	0,35	Baixo	0,27	0,54	17,03	Baixo
15	11,70	35 km/h	0,12	0,35	Baixo	0,27	0,54	17,03	Baixo
16	15,59	26 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,47	0,36	21,70	Médio
17	21,85	19 km/h	0,25	0,50	Médio	0,64	0,20	26,41	Alto
18	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,39	Médio
19	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
20	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,99	Baixo
21	11,95	34 km/h	0,81	0,90	Médio	0,29	0,53	17,44	Baixo
22	10,17	40 km/h	0,81	0,90	Médio	0,30	0,65	16,62	Baixo
23	10,17	40 km/h	0,81	0,90	Médio	0,29	0,65	16,54	Baixo
24	11,95	34 km/h	0,81	0,90	Médio	0,29	0,53	17,49	Baixo
25	11,95	34 km/h	0,81	0,90	Médio	0,29	0,53	17,44	Baixo
26	15,59	26 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,48	0,36	21,86	Médio
27	15,77	26 km/h	0,25	0,50	Médio	0,49	0,35	22,03	Médio
28	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,39	Médio
29	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
30	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,01	0,53	14,03	Baixo
31	7,94	51 km/h	0,50	0,70	Médio	0,57	0,89	18,47	Médio
32	7,47	54 km/h	0,50	0,70	Médio	0,47	0,96	16,56	Baixo
33	7,21	56 km/h	0,50	0,70	Médio	0,38	1,00	15,24	Baixo
34	7,21	56 km/h	0,50	0,70	Médio	0,38	1,00	15,25	Baixo
35	7,40	55 km/h	0,50	0,70	Médio	0,44	0,97	16,20	Baixo
36	18,28	22 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,56	0,28	24,10	Médio
37	15,77	26 km/h	0,25	0,50	Médio	0,49	0,35	22,03	Médio
38	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,39	Médio
39	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
40	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,01	0,53	14,03	Baixo
41	18,03	23 km/h	0,42	0,65	Médio	0,55	0,28	23,69	Médio
42	44,05	9 km/h	0,42	0,65	Médio	0,91	0,00	35,61	Alto
43	22,84	18 km/h	0,42	0,65	Médio	0,66	0,18	26,96	Alto
44	22,84	18 km/h	0,42	0,65	Médio	0,66	0,18	26,98	Alto
45	23,62	17 km/h	0,42	0,65	Médio	0,68	0,17	27,59	Alto
46	14,16	29 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,42	0,41	20,24	Médio
47	32,83	12 km/h	0,25	0,50	Médio	0,81	0,07	31,85	Alto
48	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,41	Médio
49	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	14,00	Baixo
50	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
51	22,22	18 km/h	0,04	0,20	Baixo	0,64	0,19	26,50	Alto
52	32,74	12 km/h	0,04	0,20	Baixo	0,80	0,07	31,61	Alto
53	17,46	23 km/h	0,04	0,20	Baixo	0,53	0,30	23,24	Médio
54	17,46	23 km/h	0,04	0,20	Baixo	0,53	0,30	23,27	Médio

Arco	T arco (seg)	Velocidade (km/h)	Variância	D. Padrão	Confiabilidade	Vol. cod	Vel. cod	VR	Risco
55	35,07	12 km/h	0,04	0,20	Baixo	0,82	0,05	32,53	Alto
56	14,39	28 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,43	0,40	20,48	Médio
57	11,98	34 km/h	0,25	0,50	Médio	0,30	0,52	17,60	Baixo
58	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,39	Médio
59	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	14,01	Baixo
60	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
61	11,95	34 km/h	0,98	0,99	Alto	0,29	0,53	17,44	Baixo
62	11,95	34 km/h	0,98	0,99	Alto	0,29	0,53	17,44	Baixo
63	11,95	34 km/h	0,98	0,99	Alto	0,29	0,53	17,44	Baixo
64	11,95	34 km/h	0,98	0,99	Alto	0,29	0,53	17,44	Baixo
65	21,26	19 km/h	0,02	0,14	Baixo	0,62	0,21	25,91	Alto
66	25,18	16 km/h	0,25	0,50	Médio	0,70	0,15	28,33	Alto
67	13,36	30 km/h	0,21	0,45	Médio	0,38	0,45	19,39	Médio
68	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	14,01	Baixo
69	11,95	34 km/h	0,49	0,70	Médio	0,00	0,53	13,97	Baixo
70	35,60	11 km/h	0,98	0,99	Alto	1,00	0,05	37,32	Alto
71	34,03	12 km/h	0,98	0,99	Alto	0,98	0,06	36,64	Alto
72	14,35	28 km/h	0,98	0,99	Alto	0,63	0,41	23,95	Médio
73	17,46	23 km/h	0,98	0,99	Alto	0,72	0,30	26,82	Alto
74	25,48	16 km/h	0,98	0,99	Alto	0,87	0,14	32,33	Alto
S	1.149,44	26 km/h							

ANEXO J – GENERALIDADES NO TRANSPORTE DE CARGA (DECOPE, 2014)

Mês de referência:		JULHO/14	
	Tipo de Cobrança	Forma de Cobrança	Sugestão
1.	Taxa de Permanência da Carga	por ton/dia ou fração	R\$ 20,65
	- seguro da carga durante a permanência	sobre o valor da mercadoria	0,20%
2.	Cubagem	300 kg/m ³	300 kg/m ³
3.	Devolução	sobre o frete original	100%
4.	Reentrega	sobre o frete original	50%
	- até o valor do frete de R\$ 63,70 cobrar	Por conhecimento	R\$ 38,53
		Toco (3/4)	R\$ 601,09
5.	Estadia de veículos por tipo de veículo	Truck	R\$ 647,32
		Conjunto (Cav.+Carreta)	R\$ 1.101,49
		Carreta (3 eixos)	R\$ 246,60
6.	Pedágio	100 kg ou fração	R\$ 4,56
7.	TAS - Taxa de Adm. SEFAZ	por conhecimento	R\$ 2,93
8.	TDE - Taxa de Dificuldade Entrega	sobre o frete original	40%
	- até o valor do frete de R\$ 245,4 cobrar	por conhecimento	R\$ 98,16
9.	TRT - Taxa de Restrição ao Trânsito		
	- Para as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro	sobre o frete original	20%
	- até o valor do frete de R\$ 207,73 cobrar	Por conhecimento	R\$ 41,55
	- Para as demais cidades	sobre o frete original	15%
	- até o valor do frete de R\$ 142,93 cobrar	Por conhecimento	R\$ 21,44
10.	TFD - Taxa de Fiel Depositário	sobre o valor da mercadoria/DIA	0,50%
	- até o valor da mercadoria de R\$ 11789,72 cobrar	por DIA	R\$ 58,95
Generalidades para empresas que atuam na região do Amazonas			
11.	Seguro Fluvial com origem/destino AM	sobre o valor da mercadoria	0,12%
	- até o valor da mercadoria de R\$ 63584,26 cobrar	sobre o valor da mercadoria	R\$ 76,30
12.	TRF - Taxa Redespacho Fluvial	sobre o valor da mercadoria	7,0%
	- até o valor da mercadoria de R\$ 1351,77 cobrar	por Redespacho Fluvial	R\$ 94,62
13.	Taxa de Administração de Suframa	por conhecimento	R\$ 36,37
Generalidades para empresas que atuam na região do Amazonas			
14.	Paletização	por palete padrão PBR	R\$ 51,15
15.	Taxa de Agendamento	s/ o valor do frete	20%
	- até o valor do frete de R\$ 104,03 cobrar	por conhecimento	R\$ 20,81
16.	Devolução de canhoto de Nota Fiscal	por documento ou canhoto	R\$ 1,73
17.	Entrega com veículo dedicado	por entrega	R\$ 601,09
18.	Coletas sábados, domingos e feriados	sobre o frete original	30%
	- até o valor do frete de R\$ 2003,6 cobrar	p/ coleta	R\$ 601,09
<p>OBS: Todos os valores citados nesta tabela são médias dos valores praticados no mercado, portanto já estão com impostos e margem de lucro. Os valores da tabela acima, com exceção do pedágio, são corrigidos mensalmente pelo INCTF.</p>			
INCTF/DECOPE/NTC - FATOR DE CORREÇÃO:		JULHO/14	(0,3110)