

Daniel de Oliveira

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE
DINÂMICO PARA SITUAÇÕES DE CRISE NO MODAL
RODOVIÁRIO CONSIDERANDO OS COMPROMISSOS
ENTRE CUSTO E RISCO DE RUPTURA NA REDE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof. Dr^a. Mirian Buss Gonçalves.

Coorientadores: Prof. Dr. José Eduardo Souza de Cursi.e Prof. Dr. Edson Tadeu Bez.

Florianópolis
2018

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

Oliveira, Daniel

Proposta de um sistema de transporte dinâmico para situações de crise no modal rodoviário considerando os compromissos entre custo e risco de ruptura na rede / Daniel Oliveira ; orientadora, Mirian Buss Gonçalves, coorientador, José Eduardo Souza de Cursi, coorientador, Edson Tadeu Bez, 2018. 127 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Caminhos Mínimos. 3. Sistemas Inteligentes de Transporte. 4. Redes Dinâmicas. 5. Soluções Pareto-ótimas. I. Gonçalves, Mirian Buss. II. Cursi, José Eduardo Souza de. III. Bez, Edson Tadeu IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. V. Título.

Daniel de Oliveira

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE DINÂMICO
PARA SITUAÇÕES DE CRISE NO MODAL RODOVIÁRIO
CONSIDERANDO OS COMPROMISSOS ENTRE CUSTO E
RISCO DE RUPTURA NA REDE**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia de Produção” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção.

Local, 21 de fevereiro de 2018.

Prof.^a Lucila Maria de Souza Campos, Dr.^a
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Mirian Buss Gonçalves, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Antônio Galvão Naclério
Novaes, Dr.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. José Eduardo Souza de
Cursi, Dr.
Orientador
Institut National des Sciences
Appliquées de Rouen

Prof. Ricardo Villarroel
Dávalos, Dr.
Universidade Federal de Santa
Catarina

Prof. Edson Tadeu Bez, Dr.
Orientador
Assembleia Legislativa de Santa
Catarina

Prof.^a Silviana Cirino, Dr.^a
Instituto Federal de Santa
Catarina

Este trabalho é dedicado à minha pequena, parceira e amada Luna. Que o tempo dedicado neste trabalho durante a sua existência nos possibilite muitos “ataques de fofura”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por existir e possuir esse ímpeto de buscar por novos desafios e conhecimentos. Também, por colocar tantos desafios nessa minha não estanque vida.

Agradecer aos meus pais Ronaldo e Marta e ao meu irmão Gabriel pelo apoio incondicional e por serem sempre um porto seguro.

À minha esposa Francielle e nossa filha Luna, que enfrentaram todos os desafios envolvidos nesta tese ao meu lado, estando presente durante os altos e baixos desse íngreme caminho.

Aos membros da banca avaliadora: prof. Novaes, prof. Ricardo e profa. Silvana, que aceitaram de bom grado fazer parte dessa minha história, lendo o trabalho e pelos comentários e sugestões.

Aos colegas de convívio do Laboratório de Pesquisa Operacional – OrLab, durante o tempo que estive presente e podemos colaborar entre si. Em especial ao colega Leonardo, pela disposição de sempre querer ajudar.

Agradecimento especial a Fabiana que foi um braço direito e parceira de publicações, sempre ajudando e apoiando quando precisei.

Agradecimento especial também à Silvana, que me ajudou durante todo o processo do doutorado sanduíche no INSA.

Os colegas da Fatenp Unigranrio, Larisa, profa. Cida e profa. Nora pela parceria e por acreditarem. Agradeço também aos professores que ajudaram e fizeram parte dessa história: Walter, Claiton, João, Carlos Gustavo, Maika e Marcelo.

Agradeço com muito carinho à professora Mirian, que foi como uma segunda mãe e me proporcionou um dos maiores e mais prazerosos desafios da minha vida: morar fora do país e conseguir o título de doutor.

Ao professor Eduardo, que foi um grande mentor e exemplo durante o meu doutorado sanduíche no INSA de Rouen na França.

Agradecimento mais que especial ao professor Edson, que sempre foi parceiro e amigo, além disso foi quem me abriu portas me apresentando a este maravilhoso grupo de professores do PPGEP.

Agradeço ao espetacular Richard, um grande irmão que o Grande Arquiteto do Universo colocou na frente nessa trajetória. Um tríplice e fraternal abraço.

RESUMO

Situações de crise no modal rodoviário acontecem quando eventos inesperados alteram as condições ideais do sistema de transporte, afetando as diversas rotas planejadas e forçando os usuários a utilizarem rotas alternativas, modificando o itinerário que estava sendo percorrido. Eventos desse tipo podem ser congestionamentos, acidentes, desastres naturais, manutenção, dentre outros. Isto implica em analisar as condições da rede de transporte periodicamente, a fim de verificar se alguma rota precisa ser recalculada, visando decisões que reflitam ganhos frente ao dinamismo das operações diárias de transporte. A popularização das tecnologias de posicionamento global por satélite, somados à evolução dos equipamentos de telecomunicação e da Internet, permitem novas possibilidades para solucionar estes problemas de transportes, os chamados Sistemas de Transporte Inteligente. Da mesma forma, os usuários estão conectados numa grande rede social colaborativa onde qualquer pessoa pode usufruir e compartilhar recursos de roteirização e localização *online*.

As redes de transporte estão presentes no dia-a-dia das pessoas sob vários aspectos. Deslocar-se de forma eficiente utilizando caminhos mínimos é um problema recorrente, tendo em vista que essa prática é o ponto de partida para solucionar outros problemas logísticos. Caminhos mínimos geralmente são tratados na literatura como a busca pelo melhor trajeto dado um critério de custo com base no tempo de viagem ou distância. Entretanto, quando dois ou mais critérios são necessários o problema se torna multiobjetivo e, então, busca-se encontrar o conjunto de caminhos Pareto-ótimos da solução. Partindo disso, visa-se neste trabalho considerar dois critérios: risco de ruptura e custo dos arcos.

Assim, considerando os custos de viagem e a disponibilidade dos arcos numa rede de transporte rodoviária como variáveis dinâmicas, apresenta-se um modelo de ITS para auxiliar os usuários do sistema de transporte a se deslocarem durante as situações de crise. Juntamente, apresenta-se um método que estabelece os compromissos possíveis entre estes critérios, de forma a agregá-los.

Os resultados encontrados demonstram que o modelo de agregação é promissor, já que diminui os impactos do dinamismo presente na rede de transporte com soluções pertencentes à frente de Pareto.

Palavras-chave: Caminhos Mínimos. Problemas de Transporte. Sistemas Inteligentes de Transporte. Redes Dinâmicas. Soluções Pareto-ótimas. Problemas biobjetivo. Simulação de Cenários.

ABSTRACT

Crisis in road transport happens when unexpected events change the ordinary conditions of the transportation system, affecting the various planned routes and force users using alternative routes, modifying the itinerary that was being traveled. Such events may be congestion, accidents, natural disasters, maintenance, among others. This implies analyzing the conditions of the transmission network periodically in order to verify if any route needs to be recalculated, aiming at decisions that reflect gains against the dynamism of the daily transport operations. The popularization of GPS technologies, as well as the evolution of telecommunication equipment and the Internet, allow new possibilities to solve these transport problems, the so-called ITS. Likewise, users are connected to a large collaborative social network where anyone can enjoy and share routing and online localization features.

Transportation networks are present in our day-to-day life in many ways. Moving efficiently using minimal paths is a recurring problem, since this is the starting point for solving other logistic problems. Shortest paths are usually treated in the literature as the search for the best path given a cost criteria based on travel time or distance. However, when two or more criteria are needed, the problem becomes multiobjective and then it aims to find the set of Pareto-optimal paths of the solution. Based on this, in this work two criteria will be considered: risk of disruption and link travel cost.

Thus, considering travel costs and the availability of a link in a road transportation network as dynamic variables an ITS model is presented to help transportation system users to move during crisis situations. In addition, a method is presented that establishes the possible compromises between these criteria, in order to aggregate them.

The results show that the aggregating model is promising, since it reduces the impacts caused by the dynamism present in the transport network with solutions belonging to the Pareto frontier.

Keywords: Minimal Paths. Transportation Problems. Intelligent Transport Systems. Dynamic Networks. Pareto-optimal Solutions. Biobjective Problems. Scenario Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Etapas da Pesquisa.	36
Figura 2.1. Espaços de Transporte Inteligentes.	40
Figura 2.2. Componentes de um ATMS – Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego.	44
Figura 2.3. Arquitetura ATIS e Fluxos das Requisições.	47
Figura 2.4. Fluxo da Informação em ITS.	50
Figura 3.1. Algoritmo Protótipo de Caminhos Mínimos.	57
Figura 3.2. Algoritmo de Dijkstra.	60
Figura 3.3. Representação do Espaço de Busca e Comparação entre Dijkstra, A* e o Método Bidirecional.	64
Figura 4.1. O Processo de Suporte à Decisão Proposto.	69
Figura 4.2. A Arquitetura Proposta e o Fluxo de Informação entre os Componentes.	71
Figura 4.3. Modelo DTIS Proposto.	72
Figura 4.4. O Processo de Validação da Informação Descoberta pelos Usuários.	76
Figura 4.5. Exemplo de resultados variando os parâmetros λ_1 e λ_2 da Equação (4.5).	82
Figura 4.6. Exemplo de interface para a relação $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$ proposta dos parâmetros.	83
Figura 5.1. Parte da área estudada. A área tracejada representa a região simulada de maior risco.	86
Figura 5.2. Resultados obtidos na primeira etapa.	87
Figura 5.3. Conjunto S_2 e a frente de Pareto I_2 encontrada após o filtro de Pareto.	89
Figura 5.4. Comparação dos resultados obtidos na primeira e terceira etapa.	90
Figura 5.5. Atividades centrais concebidas no simulador.	91
Figura 5.6. Funcionamento básico da simulação proposta.	93
Figura 5.7. Roteiro de viagem de um veículo na simulação.	96
Figura 5.8. Determinação do surgimento da ruptura no sistema em função da probabilidade Px e do limite α	98
Figura 5.9. Regiões da malha viária com chance de ruptura dado por Px	99
Figura 5.10. Evolução da probabilidade Px de algum evento de ruptura x em função do tempo da simulação.	100
Figura 5.11. Representação do cálculo da posição de um veículo e atualização de caminhos.	101

Figura 5.12. Ilustração do fenômeno no cenário hipotético.....	103
Figura 5.13. Mapa da região do experimento.....	104
Figura 5.14. Evolução de Px utilizada no experimento.....	106
Figura 5.15. Comparação entre os tempos de permanência dos veículos na simulação.....	107
Figura 5.16. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0$	108
Figura 5.17. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0.3$	108
Figura 5.18. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0.5$	109
Figura 5.19. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0.7$	109
Figura 5.20. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 1$	110
Figura 5.21. Tempos de permanência na simulação do veículo 4 pela variação de λ_1^u	111
Figura 5.22. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 1$	111
Figura 5.23. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 0.7$ e $\lambda_1^u = 0.5$	112
Figura 5.24. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 0.3$	112
Figura 5.25. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 0$	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes de Eventos de Ruptura.....	74
Tabela 2. Matriz contendo os valores de ω_{ij} normalizados para aplicação do exemplo.....	81
Tabela 3. Resultados tabulados dos 23 caminhos resultantes da primeira etapa do teste numérico.....	87
Tabela 4. Eventos da simulação.....	94
Tabela 5. Parâmetros dos Veículos.....	105
Tabela 6. Tempo de permanência dos veículos na simulação pela variação de λ_1^u	107

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (3.1)	54
Equação (3.2)	54
Equação (3.3)	54
Equação (3.4)	55
Equação (3.5)	56
Equação (3.6)	56
Equação (3.7)	66
Equação (3.8)	66
Equação (3.9)	66
Equação (3.10)	66
Equação (4.1)	78
Equação (4.2)	78
Equação (4.3)	79
Equação (4.4)	80
Equação (4.5)	80
Equação (5.1)	95
Equação (5.2)	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ADAS – *Advanced Driver Assistance Systems*
AFMS – *Advanced Fleet Management Systems*
APTS – *Advanced Public Transportation Systems*
ATIS – *Advanced Traveler Information Systems*
ATMS – *Advanced Traffic Management Systems*
AVCS – *Advanced Vehicle Control System*
CVHS – *Cooperative Vehicle Highway Systems*
CVO – *Commercial Vehicle Operations*
DRG – *Dynamic Route Guidance Systems*
DSS – *Decision Support Systems*
DTIS – *Dynamic Transport Information System*
DTNM – *Dynamic Transport Network Model*
DVRP – *Dynamic Vehicle Routing Problems*
FIFO – *First In, First Out*
GPS – *Global Positioning System*
ICT – *Information and Communications Technologies*
ITS – *Intelligent Transport Systems*
IVRGS – *In-vehicle Route Guidance Systems*
LH – Logística Humanitária
MTC – *Motorway Traffic Control*
PSM – *Path Selection Model*
RGS – *Route Guidance Systems*
SIM – *Social Interactions Model*
STC – Sistemas de Transporte Cooperativos
TIC – *Traffic Information Center*
TIS – *Traffic Information Systems*
UTC – *Urban Traffic Control*
VMS – *Variable-message Signs*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	OBJETIVO GERAL	29
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
1.3	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	30
1.4	METODOLOGIA	34
1.5	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	36
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	38
2	SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE.....	39
2.1	INTRODUÇÃO	39
2.2	GESTÃO E OPERAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE	41
2.3	INFORMAÇÃO E DIRECIONAMENTO DE USUÁRIOS	44
2.3.1	Sistemas avançados de informações ao viajante.....	45
2.4	GESTÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE	48
2.5	COMUNICAÇÃO E FLUXO DA INFORMAÇÃO NOS ITS	49
2.5.1	Fontes de informação em ITS	50
2.5.2	Proporcionando informações aos usuários	51
3	CAMINHOS MÍNIMO EM GRAFOS.....	53
3.1	DEFINIÇÕES PRELIMINARES	53
3.2	CAMINHOS MÍNIMOS DE ÚNICA ORIGEM	54
3.2.1	Formulação do problema	54
3.2.2	Algoritmos de solução.....	55
3.3	ALGORITMO DE DIJKSTRA.....	58
3.4	OUTROS MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA CAMINHOS MÍNIMOS DE ÚNICA ORIGEM	60
3.4.1	Algoritmo A*	61
3.4.2	Método <i>Branch Pruning</i>	62

3.4.3	Decomposição do problema de busca: Método de Busca Bidirecional.....	63
3.4.4	Limitando as arestas pesquisadas: Método de Busca Hierárquico.....	64
3.5	CAMINHOS MÍNIMOS MULTICRITÉRIO	65
4	MODELO PROPOSTO	67
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	67
4.2	CONCEPÇÃO DO MODELO	67
4.3	SISTEMA DE TRANSPORTE DINÂMICO PROPOSTO..	71
4.3.1	Rupturas na rede de transporte.....	73
4.3.2	Usuários e confiabilidade da informação.....	74
4.3.3	Construção de caminhos	77
4.4	CAMINHOS MÍNIMOS CONSIDERANDO CUSTO E RISCO DE RUPTURA DOS ARCOS.....	79
4.4.1	Um breve exemplo	81
5	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS	85
5.1	TESTE NUMÉRICO	85
5.1.1	Resultados obtidos e discussão.....	89
5.2	DESING DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	90
5.2.1	Notação	91
5.2.2	Funcionamento do simulador	93
5.2.3	Processo de eventos.....	94
5.2.4	Eventos da simulação.....	94
5.2.5	Eventos de veículos	95
5.2.5.1	Entrada de Veículo (E1)	95
5.2.5.2	Chegada em d_u (E2)	96
5.2.5.3	Saída de ln (E3).....	97
5.2.6	Eventos de rupturas.....	97
5.2.6.1	Entrada de ruptura (E4).....	98
5.2.6.2	Saída da Ruptura (E5).....	101

5.3	EXPERIMENTO HIPOTÉTICO	102
5.3.1	Apresentação de cenário simulado	102
5.3.2	Parâmetros da simulação	104
5.3.2.1	Veículos	104
5.3.2.2	Comportamento da curva de ruptura.....	105
5.3.3	Resultado da simulação	106
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	115
6.1	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE A – Pontos de Demanda Utilizados na Simulação.....	127

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a Logística se tornou um componente essencial nas inter-relações entre prestadores de serviços e seus clientes. Seu conceito já está intrínseco nas mais diversas atividades ou processos executados dentro da imensa cadeia de produção existente, sejam fornecedores ou clientes, operadores logísticos ou de sistemas de transporte de passageiros, ou, simplesmente, pessoas decidindo acerca de seus caminhos nos afazeres do dia a dia. Até mesmo as relações sociais modernas, por meio de ferramentas como a Internet, são dependentes da Logística, pois existe uma imensa rede de computadores oculta de seus usuários, que precisa ser gerenciada, onde seus processos são, basicamente, atividades de transporte de dados.

Segundo Novaes (2007), é por meio da Logística que se garante um nível de serviço adequado na operação de um sistema de transporte qualquer. Tanto na cadeia de suprimentos quanto no deslocamento de pessoas, a Logística tem a importante função de estreitar as relações de confiança entre as partes envolvidas, sempre evitando custos desnecessários. Assim, atividades relacionadas a transporte de matéria-prima, produtos acabados e de pessoas são executadas em função do valor do tempo, que passou a ser um dos elementos mais críticos do processo logístico (NOVAES, 2007).

Novaes (2007) ainda observa que existe, no caso da cadeia de suprimentos, uma dinâmica muito grande na oferta de produtos, resultado de uma demanda também dinâmica. Especialmente dentro de ambientes dinâmicos, sistemas de produção e transporte precisam estar integrados, de forma que fatores como eficiência, capacidade de resposta e flexibilidade possam ser alcançados e persistidos (NOVAES; BEZ; BURIN, 2013).

Logo, devido às exigências de produzir múltiplos produtos para mercados distintos, companhias do setor de produção gerenciam várias cadeias de suprimentos simultaneamente (NOVAES; BEZ; BURIN, 2013; TANDLER; ESSIG, 2013). Como consequência, toda a rede que compõe a cadeia tornou-se mais vulnerável a falhas ou rupturas, pois as empresas estão experimentando uma forte interdependência (TANDLER; ESSIG, 2013). Do ponto de vista das empresas, falhas geram danos à reputação, perda de produtividade e prejuízos financeiros, enquanto que na perspectiva do cliente, falhas significam impactos negativos na manutenção do fornecimento. De qualquer forma, tais rupturas influenciam o desempenho logístico da cadeia de suprimentos e

influenciam o aumento do valor do tempo, pois irão dificultar a entrega de um produto dentro do prazo combinado.

Neste contexto, no presente trabalho, o termo Situações de Crise será utilizado para generalizar os contextos referentes às possíveis falhas e rupturas no sistema logístico, principalmente, com foco voltado para o modal rodoviário. Este modal é fundamental para que a cadeia de distribuição funcione corretamente dentro do previsto, bem como no transporte de pessoas, pois são dependentes da infraestrutura das redes de transporte (NAGURNEY; QIANG, 2009; NOVAES, 2007).

Situações de crise no modal rodoviário acontecem quando eventos inesperados alteram as condições ideais do sistema de transporte, afetando as diversas rotas previamente selecionadas pelos usuários ou planejadores, possivelmente forçando-os a utilizarem rotas diferentes daquelas planejadas, alterando o itinerário que estava sendo percorrido. Eventos desse tipo podem ser congestionamentos, acidentes, desastres naturais, fechamento de vias, dentre outros, onde, geralmente, a malha viária é a mais vulnerável (NAGURNEY; QIANG, 2012).

Com isso, há necessidade de antever e agir à crise, bem como o dinamismo presente na oferta e na demanda, gera a forte necessidade por informação (NOVAES, 2007; TANIGUCHI; FERREIRA; NICHOLSON, 2012). A introdução do valor da informação nas atividades logísticas de uma empresa permite rastrear a evolução das remessas dentro da cadeia e, com isso, pode-se tomar as providências necessárias caso algum evento fora do esperado seja detectado (NOVAES, 2007). É sabido que a informação é importante não só para quem depende do sistema de transporte, mas também para muitas outras áreas do conhecimento.

Contudo, a popularização das tecnologias e ferramentas de posicionamento global (GPS – *Global Positioning System*) somadas à evolução dos equipamentos de telecomunicação e da Internet, estão permitindo uma nova gama de possibilidades de serviços e soluções aos problemas de transporte e deslocamento de bens e pessoas (GIANNOPOULOS, 2004; GIULI et al., 2013; NAGURNEY; QIANG, 2012; NOVAES; FRAZZON; BURIN, 2009), agregados ao conceito de espaços inteligentes (YANG; WANG, 2007). Este fato está revolucionando a maneira como os usuários de um sistema de transporte se comunicam, conectando-se numa grande rede social e construindo um ambiente colaborativo onde qualquer pessoa que disponha de um dispositivo móvel e acesso à Internet possa usufruir e compartilhar recursos de roteirização e localização em tempo real. O que vem motivando várias propostas de soluções para roteirização de veículos

baseadas em computação e telecomunicação visando responder ou antecipar a crise. Ou seja, o uso dos chamados Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transport Systems – ITS*) pode contribuir para a eliminação do não cumprimento de tarefas planejadas.

Os ITS empregam as modernas tecnologias e métodos de computação, controle e comunicação, com a finalidade de resolver problemas de transporte e Logística (GARRETT, 1998; JARAŠŪNIENE, 2007). São capazes de realizar, dentre outros aspectos e abordagens tecnológicas, gerenciamento e controle de tráfego, gestão de frotas e mercadorias, informações sobre o transporte público e respectivas passagens, além de informações e orientações aos motoristas (SLINN; MATTHEWS, 2005). Proporcionam um enorme potencial para avanços benéficos em ecologia, segurança, equidade, mobilidade e eficiência (GARRETT, 1998), reduzindo os custos externos de transporte, aumentando o nível de serviço e a confiança do sistema, promovendo, portanto, a satisfação dos usuários (TSEKERIS et al., 2012). O grande objetivo dos ITS é prover informações aos usuários de forma a auxiliar na tomada de melhores decisões tanto antes da viagem, como na escolha de como, quando ou se devem viajar, assim como durante a viagem, sugerindo melhores rotas a seguir diante às mudanças que possam afetar o planejamento inicial (JEFFERY, 1999). O citado avanço tecnológico ainda permitirá diversas possibilidades para os ITS (GIANOPOULOS, 2004).

Sistemas de Informação Avançada ao Viajante (*Advanced Travelers Information Systems – ATIS*) são uma categoria de ITS que provêm serviços de informações em tempo real aos usuários e ajudam a tornar mais eficiente a distribuição de rotas, bem como a escolha de modais (ADLER; BLUE, 1998; WAHLE et al., 2001). Seu principal componente é a capacidade de sugerir rotas de forma inteligente, dadas as condições de viagens atuais ou previstas (THAKURIAH; SEN, 1996), munindo o usuário com informações em tempo real e recomendando rotas dinamicamente durante a viagem. Esta tecnologia foca nas necessidades do usuário, por meio de canais de comunicação como dispositivos *In-vehicle Route Guidance Systems* (IVRGS), dispositivos móveis, quiosques de informação e a Internet, sendo capazes de difundir a informação e receber *feedbacks* do usuário paralelamente.

Tais tecnologias estão auxiliando a conceber novos conceitos e, conseqüentemente, estão conduzindo à quebra de paradigmas. Estão tornando realidade conceitos como as redes dinâmicas (BEN-AKIVA; PALMA; ISAM, 1991); estão permitindo a aplicação de detecção de falhas aos serviços de transporte e logística (NOVAES; BEZ; BURIN,

2013), bem como o desenvolvimento da Roteirização Dinâmica de Veículos (*Dynamic Vehicle Routing Problems – DVRP*) (LARSEN; MADSEN; MARIUS, 2008; NOVAES; FRAZZON; BURIN, 2009). Somado a isso, estão amparando propostas de novas ferramentas para atuar em situações emergenciais, Gestão de Desastres e Logística Humanitária (NAGURNEY; QIANG, 2012; NOGUEIRA, 2010; TANIGUCHI; FERREIRA; NICHOLSON, 2012).

ITS vêm sendo estudado de longa data e, por serem instrumentos concebidos essencialmente pela evolução da tecnologia, seus objetivos e propostas sempre estiveram preocupadas com as condições dinâmicas de operação (BEN-AKIVA; PALMA; ISAM, 1991), portanto, atentados à informação em tempo real (HU; MAHMASSANI, 1997; LIAO; HU, 2011; PAMUŁA, 2012).

Várias pesquisas tratam desse dinamismo para solucionar problemas gerenciais de transportes sob vários aspectos, como roteirização de veículos sob influência do tráfego de veículos e riscos de congestionamentos (KIM; LEWIS; WHITE, 2005; NOVAES; FRAZZON; BURIN, 2009; TANIGUCHI; SHIMAMOTO, 2004) ou no contexto da economia do consumo energético (TSUGAWA; KATO, 2010). No entanto, tais pesquisas tratam das redes de transporte com enfoque voltado para Sistemas de Informação e Controle de Tráfego (*Traffic Information Systems – TIS*), onde o objetivo é simular o comportamento do usuário frente ao estado atual das movimentações, dado pelo carregamento nos diversos fluxos, tratando do dinamismo da rede de transporte sobre o ponto de vista da incerteza, através de modelos estocásticos e simulação. Isso estimula estudos para análise e predição de tráfego (MIKLUŠČÁK; GREGOR; JANOTA, 2012; PAMUŁA, 2012).

O uso dos dispositivos móveis e localização em tempo real, nos transportes, vêm sendo sugerido por outras pesquisas (ASAKURA; HATO; SUGINO, 2005; HAWAS; NAPENAS; HAMDOUCH, 2009; ZEIMPEKIS; GIAGLIS, 2005), instigando e ampliando o conceito de Sistemas de Transporte Cooperativos (*Co-operative Transport Systems*) (SZUCS, 2009). Giuli *et al.* (2013) apresentam um estudo qualitativo sobre abordagem cooperativa no domínio de serviços de informação em mobilidade. O trabalho de Tanimoto e Sagara (2011) demonstra que tecnologias de compartilhamento de informações, durante deslocamentos de usuários, melhoram a função utilidade da sociedade como um todo.

Na prática, tais pesquisas têm tratado os dados sem considerá-los integrados ao sistema como um todo, não considerando os usuários como uma rede social colaborativa, para influenciar nas decisões de transporte e logística. Dessa forma, os trabalhos são centrados no veículo e não no

usuário (SZUCS, 2009). Surge, então, uma lacuna de pesquisa sob o ponto de vista de sistemas de informação colaborativos voltados para assistir o sistema de transporte.

Neste trabalho, o foco será o fator dinâmico da rede de transporte rodoviária, onde apresenta-se um modelo teórico e um método para cálculo de caminhos mínimos que possibilite o desenvolvimento de um ITS capaz de auxiliar os usuários do sistema de transporte a se deslocarem durante as situações de crise. Espera-se, com isso, diminuir os impactos dados pelo dinamismo presente na rede de transporte, por meio de decisões e rotas mais precisas, tendo como base um comportamento colaborativo entre usuários do sistema de transporte para a tomada de decisão.

1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar uma modelo capaz de resolver problemas de caminhos mínimos, considerando os compromissos entre custo e risco de ruptura nos arcos de uma rede de transporte, dentro de um tempo computacional aceitável para que seja aplicável, dessa forma, a ambientes dinâmicos, frente ao risco de crise.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a finalidade de atingir o objetivo geral desta pesquisa, deverão ser alcançados os seguintes objetivos específicos:

- Propor um modelo teórico para redes de transporte dinâmicas que suporte a vários problemas de transporte;
- Propor um algoritmo capaz de resolver problemas de caminhos mínimos que considere as variáveis custo e risco de ruptura nos caminhos em ambientes dinâmicos;
- Estudar algoritmos ou heurísticas capazes de resolver problemas de construção de caminhos mínimos, considerando o modelo proposto (de forma que seja possível sua aplicação num ATIS);
- Desenvolver um *software* que implemente o modelo proposto e que sejam considerados mais de um critério para a solução dos caminhos mínimos;
- Avaliar o sistema proposto por meio de replicações de cenários, juntamente com problemas específicos;

- Aplicar a ferramenta computacional num estudo de caso hipotético, considerando o risco de ruptura através de uma rede de transporte real.

1.3 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

As estradas exercem importante papel no desenvolvimento econômico e social de um país. No Brasil, o transporte rodoviário é considerado a principal via de integração nacional. Tendo a disposição aproximadamente 1,7 milhões de quilômetros de estradas, distribuídas nas diferentes regiões brasileiras, este modal é fundamental no transporte de passageiros e no escoamento da produção industrial e agrícola para abastecer seus grandes centros consumidores (AGENCIA NACIONAL DE TRANPOSTE TERRESTRE, 2013).

Segundo pesquisa do IPEA (NETO; PAULA; SOUZA, 2011), o investimento público federal em rodovias vem aumentando consideravelmente, passando de R\$ 1,3 bilhão em 2003 para R\$ 10,3 bilhões em 2010. Da mesma forma, o investimento por quilômetro nas estradas públicas federais, no mesmo período, aumentou de R\$ 24 mil/km para R\$ 178 mil/km. Além disso, rodovias são responsáveis por mais de 70% dos bens movimentados no país, ou seja, grande parte das mercadorias que alimentam mercados externos passa em algum momento pela malha rodoviária federal, estadual ou municipal (BRASIL, 2009; NETO; PAULA; SOUZA, 2011).

Medidas do governo brasileiro que impactaram o setor de produção e o consumo de veículos como, por exemplo, a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), através da Medida Provisória n. 451/08 e Decreto 6.809/09, reforçam a importância relacionada com as estradas referente ao transporte e movimentação de pessoas nas cidades. Medidas que também geram consequências negativas, inflando as vias de transporte das cidades e causando sérios problemas de mobilidade, pois motivam uma forte dependência do modal rodoviário.

Visto que a demanda, constantemente em evolução, tem exigido volumes maiores de cargas para serem transportadas a distâncias cada vez mais longas e problemáticas, as estradas, precisam ser transitáveis em qualquer época do ano, sob pena de prejudicar a qualidade do serviço. Caso isto não seja possível, disponibilizar canais apropriados para informar as condições atuais da malha viária seria de grande valia na seleção e construção de roteiros alternativos, tanto por parte dos usuários, como planejadores dos serviços de transporte. Portanto, o rápido crescimento da computação, dos sistemas de comunicação e de tecnologia

da informação são elementos importantes para motivar novos horizontes e paradigmas nas atividades de transporte, bem como otimizar processos e recursos (NAGURNEY; QIANG, 2012; NOVAES; BEZ; BURIN, 2013).

A necessidade por serviços de telefonia móvel com suporte a banda larga vem crescendo e amadurecendo no Brasil, com muitas regiões já atendendo plenamente o serviço 4G. Isso é motivado pela conjuntura econômica do país que influencia e gera impactos no Setor de Telecomunicações, aliado ao fato das pessoas sentirem a necessidade de estreitarem seus laços de convívio, bem como facilitar suas atividades diárias. Segundo relatório da ANATEL (AGENCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2013), entre os anos de 2011 e 2012 a quantidade de acessos ao serviço de telefonia móvel aumentou 27,62%, contabilizando 261,81 milhões de acessos no final de 2012. Nesse mesmo período, a tecnologia que apresentou o maior crescimento foi a WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), com aumento de 57,8%, refletindo a procura massificada pela banda larga 3G. Com relação à infraestrutura, o relatório revela que 2.865 municípios brasileiros recebem cobertura do serviço móvel 3G, o que representa em torno de 51,5% do território nacional coberto por esta tecnologia. Atualmente observa-se um esforço do governo brasileiro em adotar e implantar redes 4G no território nacional, visando modernizar e aumentar a velocidade de resposta.

Com relação aos ITS, estes recursos de comunicação avançados, como redes de computadores e acesso à banda larga móvel, são essenciais para sua operação eficiente. O planejamento operacional moderno se valerá de uma rede representativa da malha de transporte, monitorada por ferramentas e coordenada por regras que assimilem o comportamento dinâmico das condições das vias devido aos diversos eventos que irão modificar a topologia desta rede e, conseqüentemente, irão transformar grandes massas de dados em informações relevantes, úteis à construção de caminhos confiáveis aos seus usuários que desejam se deslocar dentre os diversos pontos geograficamente distribuídos, visando sempre prover um serviço que mantenha bom desempenho do sistema de transporte.

Isto implica em analisar as condições da rede de transporte periodicamente, a fim de verificar se alguma rota precisa ser refeita. Significa, ainda, que todos os tipos de problemas que dependem da construção de rotas como problemas de localização, roteirização, transportes, designação, zoneamento e fluxo em redes, também são afetados, dado que os ótimos locais e o ótimo global se alteram juntamente com as características da rede. Dessa forma, é importante ter o conhecimento do estado atual da rede, para se tomar decisões que

reflitam em ganhos estratégicos frente ao dinamismo das operações diárias de transporte. As condições da estrada e sua variabilidade resultante não podem ser ignoradas a fim de realizar uma otimização de qualidade (LECLUYSE; WOENSEL; PEREMANS, 2009).

Para tanto, pode-se lançar mão dos conceitos de detecção de falhas e Sistemas de Transporte Cooperativos (STC). Segundo Novaes, Bez e Burin (2013), o objetivo do processo de detecção de falhas é antecipar atividades não conformes visando evitar situações de crise. No entanto, complementam os autores, este conceito é pouco aplicado no âmbito dos sistemas de transporte. Já o conceito de STC propõe o compartilhamento de informações entre a infraestrutura de transporte, veículos e usuários, por meio de instrumentos e processos inteligentes (SZUCS, 2009).

Sumiła (2012) diz que informações sobre o estado da rede de transporte em ITS podem ser detectadas por veículos ou pela própria infraestrutura de transporte, cada um com a sua interface de comunicação para propagar a informação descoberta. O mesmo autor ainda afirma que os veículos são, ao mesmo tempo, os principais geradores e recebedores de informação. No entanto, como citado anteriormente, muitas pesquisas apontam para uma forte dependência da tecnologia embarcada na infraestrutura de transporte para interagir com os veículos.

Apesar desta tecnologia ser realidade em grandes cidades pelo mundo, requer grandes investimentos que, muitas vezes, são impecilho para sua ampla utilização nos países em desenvolvimento (NOVAES; BEZ; BURIN, 2013). Dessa forma, para tratar deste problema, propõe-se complementar os conceitos dos Sistemas de Informação de Tráfego (TIS) e de Informações Avançadas ao Viajante (ATIS), tornando o segundo sistema parte integrante do primeiro, de forma que atuem sob o véu do STC.

Nesta pesquisa, isso serve de motivação para investigar como tal integração seria possível por meio da colaboração entre os usuários do sistema e tirando vantagem dos dispositivos móveis modernos para localização em tempo real nos transportes. Assim, aproveita-se a infraestrutura de internet móvel já disponível, bem como dos equipamentos em posse dos usuários. Parte do custo é transferida para o usuário, que deve adquirir equipamentos compatíveis com o ATIS, barateando a implantação da infraestrutura TIS.

O recurso da internet também serve para fazer o usuário interagir com o sistema de uma forma mais transparente, outra motivação deste trabalho, relacionada com o crescimento das novas formas de interação social. As mídias sociais baseadas em computador estão ajudando a manter relações sociais com mais eficiência, bem como nos mantêm

atualizados com diversas informações referentes a variados tópicos e pessoas. Além disso, tais mídias já estão incorporadas nos modernos dispositivos móveis, oferecendo um canal ubíquo natural para estas interações (KLEIN et al., 2013). Com isso, informações adquiridas dessa forma poderão influenciar as escolhas de um usuário visando encontrar melhores rotas (CHORUS et al., 2006; SUMİLA, 2012).

Outra motivação é a aplicação deste tipo de solução na Logística Humanitária (LH). A crescente preocupação da comunidade internacional em relação ao número de pessoas afetadas e a recorrência de desastres produzidos por fenômenos de ordem natural ou não, têm incitado a necessidade de ferramentas de coordenação de tarefas entre os diversos atores envolvidos, objetivando melhorar a agilidade da cadeia de alívio e evitar imprevistos. Blecken (2010) aponta que nos próximos 50 anos, tanto os desastres naturais quanto os provocados pelo homem irão aumentar em cinco vezes e seus custos, em todo o mundo, poderão atingir US\$ 64 trilhões. Conforme Tomasini e Van Wassenhove (2009), 80% dos custos nas operações de socorro são devidos à logística. Portanto a coordenação da cadeia neste tipo de operação é fundamental para melhorar o seu desempenho. Blecken (2010) e Balcik; Beamon e Smilowitz (2008) assinalam a necessidade de sistemas de tecnologia da informação para esse fim, bem como para automatizar e medir os esforços humanitários.

Uma das principais barreiras para o desenvolvimento da Logística no Brasil sempre esteve relacionada com as deficiências encontradas na infraestrutura de transportes e comunicação. Da mesma forma, coordenar os usuários durante a situação de crise é uma tarefa difícil, bem como conceber maneiras automatizadas para detecção de crises. Têm-se, então, a seguinte problemática para esta pesquisa:

Se houvesse algum meio pelo qual os usuários pudessem colaborar entre si, compartilhando informações sobre localização, as condições de transporte e rupturas existentes de forma confiável, como seria possível tornar isso vantagem para todos os envolvidos? Quais implicações existem na manutenção da condição da rede, bem como na construção de caminhos e roteiros tanto no planejamento, como na atualização dos mesmos durante o percurso, de forma que todos estariam seguindo as soluções mais adequadas para cada caso? Seriam as redes sociais uma forma de melhorar e facilitar a interação entre usuários e a infraestrutura de transporte?

Transportar não é apenas uma questão técnica é, ao mesmo tempo, uma questão social e política, pois organiza o movimento de pessoas e

produtos no espaço urbano e rural. Desse modo, a área de transportes necessita de soluções que caminhem rumo ao desenvolvimento sustentável e, igualmente, às boas soluções para os efeitos negativos provocados pelo consumo de transportes. Nesse contexto, as decisões sobre o assunto devem ser embasadas em análises abrangentes, que avaliem alternativas por meio de múltiplas interações.

Espera-se, com este trabalho, diminuir os impactos dados pelo dinamismo presente na rede de transporte, gerando, dessa forma, decisões e rotas mais precisas, sobre o ponto de vista, principalmente, de um comportamento colaborativo entre os usuários do sistema, nas atividades de monitoramento da malha viária. Posto isso, espera-se contribuir com a teoria, através da concepção de conceitos e um modelo, bem como com a prática, pelo desenvolvimento de um *software* protótipo, juntamente com os algoritmos necessários e simulações pertinentes considerando os devidos compromissos entre critérios específicos importantes para o transporte e logística.

1.4 METODOLOGIA

Pesquisar trata-se de realizar um exame cuidadoso para descobrir novas informações ou relações, ampliar e verificar o conhecimento existente sobre um determinado tema, fundamentado num referencial teórico preexistente, que discute as descobertas encontradas, análises e opiniões dos autores consultados (GRESSLER, 2004); essencialmente, visa produzir conhecimento novo, relevante de forma teórica e social, assim como fidedigno (LUNA, 2011). A pesquisa científica engloba aqueles processos de estudo, experimentação, construção dos conceitos e provas envolvidos na obtenção do conhecimento científico.

Segundo Gressler (2004), a metodologia desenvolve a preocupação em torno de como captar e manipular a realidade, questionando a cientificidade da produção tida como científica. Ou seja, desafia a comprovação daquilo que se crê científico. Assim, a metodologia trata das formas de se fazer ciência, cuidando dos procedimentos, ferramentas e caminhos que embasam uma pesquisa num determinado paradigma.

Posto isso, a metodologia utilizada nesta pesquisa está fundamentada numa abordagem de natureza quantitativa. O método quantitativo é caracterizado pela construção de hipóteses, definições de variáveis, coleta de dados e levantamento de informações, bem como tratamentos estatísticos dos dados obtidos. Visa garantir a precisão dos resultados e, conseqüentemente, evitar distorções de análise e

interpretação (GRESSLER, 2004; LUNA, 2011). As hipóteses estabelecidas nesta abordagem exigem uma relação de causa e efeito, de forma que as conclusões encontradas são apoiadas em comprovações e testes. Ainda segundo Gressler (2004), os critérios da cientificidade são a verificação, a demonstração, os testes e a lógica matemática, onde valoriza a experiência sensível e a realidade é constituída de fatos que podem ser observados.

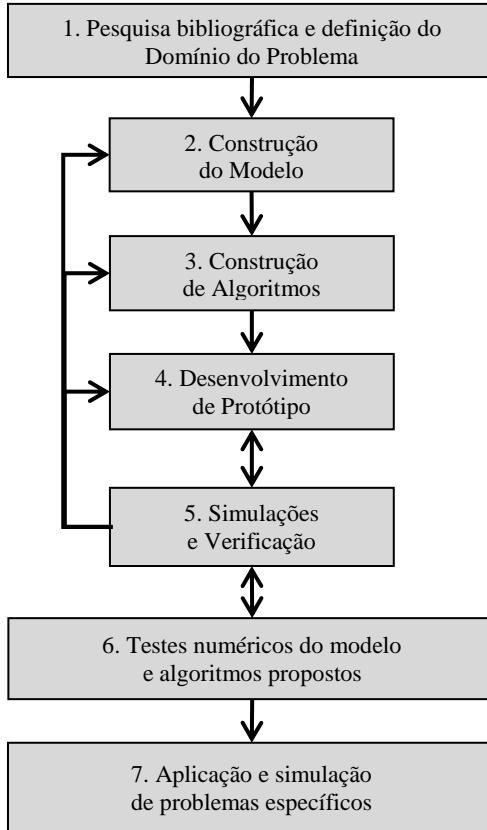
A pesquisa apresenta, ainda, duas tipologias sendo uma exploratória e outra descritiva. Exploratória no sentido em que busca proporcionar um maior conhecimento do tema de investigação, sendo apropriada para os primeiros estágios da pesquisa. Com relação à tipologia Descritiva, esta busca dar maior importância à descrição do processo em que as variáveis se relacionam do que propriamente mostrar que esse relacionamento ocorre em termos de causa (s) e efeito (s), ou seja, o foco é o de descrever o fenômeno em si.

As etapas de pesquisa dizem respeito aos procedimentos operativos utilizados para atingir-se os objetivos específicos e, através destes, o objetivo geral. Assim, para dar prosseguimento neste trabalho, a Figura 1.1 apresenta aquelas etapas que foram utilizadas no decorrer deste trabalho de pesquisa.

O trabalho conterá sete etapas interdependentes e bem definidas, sendo que a primeira delas consta do levantamento bibliográfico cujo intuito é encontrar os parâmetros primários para a execução da pesquisa, como as perguntas de pesquisa e delimitação do trabalho a ser executado. Na segunda etapa pretende-se construir o modelo do Sistema de Transporte Dinâmico propriamente dito, bem como o estudo de teorias relacionadas para a concepção dos seus componentes. A terceira etapa diz respeito a pesquisa ou possível construção de algoritmos e heurísticas necessárias a resolução de problemas de transporte sobre o modelo proposto. Na quarta etapa será implementado um *software* protótipo encapsulando o que será definido e acordado nas etapas anteriores. Uma validação e verificação do protótipo serão feitos na quinta etapa, com base em técnicas de modelagem e simulação. Após isso, a fim de se fazer uma validação mais completa, na sexta etapa um problema clássico de transporte será colocado na perspectiva do modelo e resolvido através do protótipo proposto. Até este ponto, as etapas apresentadas são fortemente interdependentes, isto é, as descobertas e problemas encontrados numa etapa podem influenciar a etapa imediatamente anterior ou influenciar diretamente qualquer outra etapa anterior. Assim, pode ser necessário retroceder etapas para melhorar e recalibrar variáveis. Então, na última etapa, após tudo estar devidamente calibrado e testado, a pesquisa será

posta à prova com sua aplicação em cenários simulados de problemas específicos em Logística Humanitária.

Figura 1.1. Etapas da Pesquisa.



Fonte: o autor.

1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

A concepção de um ITS envolve diversas implicações técnicas em infraestrutura computacional e algorítmica. Principalmente no que diz respeito ao meio físico de comunicação e volume de dados gerados por todos os componentes interconectados entre si através desse meio. Isto é, de nada adianta coletar informações do sistema de transporte se não for possível transmiti-la. Contudo, esta pesquisa não tem seu foco voltado

para tratar do dimensionamento da infraestrutura de redes de computadores necessária à implantação do sistema proposto, e sim pretende desenvolver metodologias a fim de facilitar esta transmissão de dados.

Dessa forma, este trabalho visa propor um modelo de sistema centralizado capaz de solucionar problemas de transporte ao mesmo tempo em que permite a cooperação entre os usuários e demais dispositivos que estão conectados a infraestrutura de transporte, investigando como definir estruturas de dados consistentes e algoritmos eficientes que gerem respostas com desempenho quase em tempo real.

Também não se pretende fazer constar, no escopo desta pesquisa, conceitos de engenharia de tráfego e, conseqüentemente, equilíbrio de fluxos em redes de transporte. No entanto, admite-se que o trabalho possa beber um pouco desta fonte no decorrer do seu andamento.

Neste trabalho, são considerados dois critérios para o problema: a distância e o risco de ruptura de um arco, ou seja, a probabilidade do arco ser eliminado do grafo em função de um evento qualquer inerente à rede de transporte. Na literatura, considera-se o conceito de risco geralmente ligado a problemas de transporte de materiais perigosos (LEONELLI; BONVICINI; SPADONI, 2000; TOUMAZIS; KWON, 2013) ou a questões sociais de segurança (CHANDRA, 2014), o que não é o caso específico desta pesquisa. Pretende-se aqui, explorar o problema dentro dos conceitos de vulnerabilidade de redes de transporte (JENELIUS; MATTSSON, 2015), onde eventos de rupturas são considerados críticos aos problemas de logística num contexto dinâmico.

No entanto, não se entra a fundo neste trabalho no conceito de índices de risco, estando-se mais focado nas questões de como estes índices podem ser aplicados à resolução de problemas de caminhos mínimos, de forma a serem considerados como um dos critérios para a formação dos custos de viagem.

O estudo de redes engloba muitas disciplinas e seu conceito provê as bases para resolver problemas em Transporte e Logística, comunicação, provisão de energia, interações sociais e finanças (NAGURNEY; QIANG, 2009). Da mesma forma, nesta pesquisa, o termo “redes” está atrelado a vários conceitos, possuindo um sentido muito amplo. Serão diferentes redes operando simultaneamente, cada uma com a sua própria infraestrutura, para que o propósito desejado seja atingido. Portanto, algumas considerações são necessárias: a rede de computadores ou de comunicação é o meio de transmissão de dados; a rede social assimila o conceito colaborativo; a rede de transporte é a rede física, presente no mundo real, por sobre a qual irão trafegar os usuários;

e, finalmente, a rede de transporte dinâmica representa a rede de transporte, na forma de um *software*, responsável por calcular caminhos levando em conta os eventos dinâmicos.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste capítulo, foram apresentados os objetivos desta pesquisa, bem como a justificativa e motivação para sua realização, sua delimitação e metodologia planejada, bem como a sua estrutura geral. Isso resultará numa revisão não somente dos conceitos envolvidos, mas numa avaliação do cenário corrente sobre sistemas inteligentes nos transportes e como esta ferramenta pode ser utilizada para construir uma rede dinâmica visando resolver problemas de transporte no modal rodoviário.

Para a escrita deste texto e considerando que esta pesquisa envolve várias disciplinas, optou-se por iniciar o texto com uma abordagem mais generalista até atingir, então, a proposta final com uma abordagem específica. Sendo assim, segmentou-se a fundamentação teórica. No primeiro momento, apresenta-se uma revisão sobre Sistemas de Transportes Inteligentes (ITS) e, no segundo momento, fundamenta-se teoricamente os métodos utilizados para a modelagem e construção de caminhos mínimos em grafos. Assim, o assunto é explorado gradativamente em cinco capítulos, incluindo este introdutório.

No Capítulo 2, apresenta-se a Fundamentação Teórica I, onde se relacionam os conceitos, a classificação e o contexto dos ITS para o trabalho em questão, bem como as diretrizes para que um sistema desse porte funcione de forma satisfatória. Em seguida, no Capítulo 3, é apresentada a Fundamentação Teórica II, onde são descritos os métodos utilizados para ajudar a compor a modelagem do problema em estudo, suas definições e técnicas ao mesmo tempo em que contextualiza e relaciona estes métodos com a pesquisa.

Continuando, no Capítulo 4 apresenta-se o modelo proposto referente à rede dinâmica, considerando suas delimitações e características, bem como o modelo matemático para construção de caminhos bi critério. Já no Capítulo 5 são apresentados o teste numérico para validação da metodologia de caminho mínimos proposta, juntamente com a construção e aplicação de um simulador para demonstrar o modelo funcionando na prática.

Por fim, são apresentadas no Capítulo 6 as considerações finais do trabalho, apontando as conclusões obtidas e sugestões de trabalhos futuros que podem ser inspirados por esta pesquisa ou ampliação da mesma.

2 SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

2.1 INTRODUÇÃO

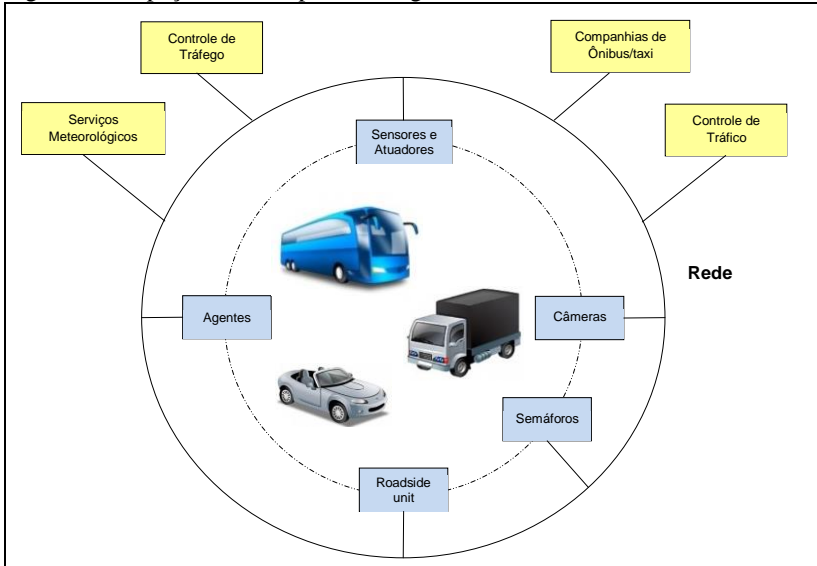
Os Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transport Systems – ITS*) aplicam tecnologias embarcadas de hardware e software na melhoria dos serviços e atividades de transporte. Ou seja, tiram vantagens das Tecnologias de Comunicação e Informação (*Information and Communications Technologies – ICT*) com benefícios em segurança, eficiência e conforto beneficiados pelo provimento de informações sobre o tráfego de veículos, redução de fluxos e gestão aprimorada de rotas (GIANNOPOULOS, 2004; YANG; WANG, 2007). ITS referem-se a uma ampla gama de aplicações das ICT em todas as categorias do setor dos transportes a fim de contribuir para a otimização da gestão operacional e financeira das redes de transporte (TSEKERIS et al., 2012).

Assim, vários são os serviços oferecidos aos usuários como, por exemplo: informações pré-viagem; assistências durante o percurso da rota; serviço de informação ao viajante; gerenciamento de incidentes; controle de tráfego e gerenciamento de demanda. Segundo García-Ortiz, Amin e wootton (1995), o tipo de serviço oferecido pelos ITS pode categorizá-los. Alguns exemplos são: Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego (*Advanced Traffic Management Systems – ATMS*); Sistemas Avançados de Informações ao Viajante (*Advanced Traveler Information Systems – ATIS*); Sistema de Controle de Veículos Avançado (*Advanced Vehicle Control System – AVCS*); Operações de Veículos Comerciais (*Commercial Vehicle Operations – CVO*) e Sistemas Avançados de Transporte Público (*Advanced Public Transportation Systems – APTS*).

Recentes avanços em comunicação, processamento de sinais, protocolos de comunicação sem fio deram origem a muitos dispositivos e objetos abertos às aplicações inteligentes. Comunicações ininterruptas entre esses dispositivos e os possíveis centros de processamento podem transformar ambientes comuns em espaços inteligentes. Espaços inteligentes se tornarão as aplicações mais comuns em casas, locais de trabalho, salas de aula e hospitais (YANG; WANG, 2007). Yang e Wang (2007) já apontavam que veículos e infraestrutura de transporte iriam depender de espaços de transporte inteligentes no futuro, pois manteriam os veículos conectados com seus ocupantes, além de outros veículos e sistemas. Fato este que já é realidade nos dias atuais e oferece recursos para análise de tráfego, rotas e condições climáticas, visando uma viagem segura e eficiente, bem como a resolução de problemas gerenciais relacionados ao transporte. A Figura 2.1 esquematiza essa relação

mostrando veículos, coletores de dados na infraestrutura de transporte e alguns serviços que podem usufruir das informações geradas.

Figura 2.1. Espaços de Transporte Inteligentes.



Fonte: Adaptado de Yang e Wang (2007).

Sistemas de Suporte a Decisão (*Decision Support Systems – DSS*) são tecnologias baseadas em computador projetadas com a finalidade de dar suporte à resolução de problemas complexos e, conseqüentemente, maximizar os resultados durante o processo de tomada de decisão (ARNOTT, 2004; SHIM et al., 2002). Pesquisas nesta área são tipicamente voltadas para responder como tecnologias de informação podem melhorar a eficiência pela qual um usuário toma uma decisão, bem como melhorar a eficácia dessa decisão (SHIM; MATTHEWS; GUEST, 2002).

Com isso, os DSS evoluem e se proliferam juntamente com a evolução das tecnologias de processamento de informação aplicadas à resolução de problemas nas atividades de tomada de decisão, o que contribuiu para o posterior surgimento dos sistemas inteligentes de suporte a decisão (LIM; JAIN, 2010). Sua evolução vem desde os primeiros sistemas baseados em planilhas, incorporando, em seguida, modelos de otimização até atingirem seu posterior aprimoramento por meio da inteligência artificial e estatística (MICHALEWICZ et al., 2005). Atualmente, a tecnologia envolvida nos DSS permite tirar vantagem das

oportunidades que a Internet proporciona, especialmente no que diz respeito à rápida disseminação de informações aos tomadores de decisão, impactando positivamente na eficiência dos processos, tornando-os mais acessíveis e criando novas possibilidades (SHIM et al., 2002).

Dentre os diferentes tipos de DSS apontados por Lim e Jain (2010), aqueles baseados em modelos (*model-driven*) são sistemas concebidos em função de algum modelo analítico ou matemático, de ordem combinatória, visando analisar diferentes alternativas. Como demonstra Arnott (2004), a taxonomia desses sistemas é composta, entre outros, pelos Modelos de Otimização e Modelos de Sugestão. O primeiro provê diretrizes de ação através de uma solução ótima e o segundo fornece suporte para processamento de uma decisão sugerida para uma tarefa específica.

Estas mesmas funções e modelos se aplicam aos DSS orientados ao transporte. As ferramentas baseadas em computador para resolver problemas relacionados aos transportes proveem diferentes funcionalidades e vantagens competitivas para a tomada de decisão nas operações de transporte, de forma a auxiliar na gestão da mobilidade, transporte de bens e de pessoas (GIULI et al., 2013; ZAK, 2010). Assim, para dar suporte aos DSS nos transportes, várias outras tecnologias têm impactado positivamente na evolução dos serviços de transporte como os mapas digitais, serviços de Internet, dispositivos móveis e de posicionamento global, telemática, capacidade de processamento dos sistemas computacionais e sua condição ubíqua em função das redes de computadores e Internet banda larga (a chamada computação em nuvem).

Neste capítulo, são examinadas diversas aplicações voltadas para assistir ao transporte no contexto de ITS que serão agrupadas em três principais grupos, adaptados com base nos trabalhos de García-Ortiz, Amim e Wootton (1995), Giannopoulos (2004) e Slinn, Matthews e Couitney (2005): (i) gestão e operação de redes de transporte (no modal rodoviário); (ii) informação e direcionamento de usuários; e (iii) gestão e operação de sistemas de transporte. Além disso, o capítulo será finalizado com um breve comentário sobre como funcionam a comunicação e o fluxo de informações, críticos nesses tipos de sistemas.

2.2 GESTÃO E OPERAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE

Como neste trabalho o foco está voltado para o contexto do modal rodoviário, esta seção refere-se aos ferramentais aplicados à atividade de Gestão e Controle de Tráfego Rodoviário. Como isto é o alicerce para viabilizar um ITS, dará suporte para todos os outros aspectos técnicos

relacionados. Segundo García-Ortiz, Amim e Wootton (1995), os sistemas conectados à infraestrutura pública de transporte responsável por esta atividade também são chamados de Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego (*Advanced Traffic Management Systems – ATMS*).

De acordo com Slinn, Matthews e Couitney (2005), a atividade de Gestão e Controle de Tráfego necessita de informações sobre fluxos de tráfego, filas, velocidades e demais características dos veículos, bem como informações com respeito a rupturas na rede de transporte, em função de acidentes ou demais obstruções. Ao mesmo tempo, têm como objetivos, dentre outros apontados em Slinn, Matthews e Couitney (2005), influenciar o comportamento dos usuários durante as escolhas de modais, melhores rotas e quando executar suas viagens; restringir o tráfego em áreas sensíveis ou de risco; e gerenciar as demandas e congestionamentos de forma eficiente. Dessa forma, os componentes de um ATMS, ou seja, que constituem o ambiente de gestão e operação de redes rodoviárias, podem ser agrupados de acordo com funções específicas (GARCÍA-ORTIZ; AMIM; WOOTTON, 1995; GIANOPOULOS, 2004), que serão brevemente detalhadas a seguir.

Inicialmente, têm-se os sistemas para obter e difundir informações de tráfego onde as informações, tanto dinâmicas quanto estáticas, são coletadas através de vários canais e modos disponíveis (seção 2.5). Uma central de informação de tráfego (*Traffic Information Center – TIC*) analisa os dados referentes ao fluxo de veículos, bem como incorpora outras informações úteis, no intuito de consolidar e disponibilizar aos usuários subsídios relevantes para que cada um usufrua e tome suas decisões conforme seus propósitos.

Outro grupo de componentes, são daqueles responsáveis pela otimização de desempenho da rede de transporte e gestão do tráfego. Inclui todos os sistemas e ferramentas para cumprir os requisitos de controle de acesso e orientação de usuários, assim como as várias aplicações e estratégias de gestão de tráfego. Também estão inclusos nesta área, métodos para melhorar a compreensão das condições da rede. Os componentes que permitem realizar estas funções de controle de rede e gestão de tráfego são os sistemas de Controle de Tráfego Urbano (*Urban Traffic Control – UTC*) e Controle de Tráfego Rodoviário (*Motorway Traffic Control – MTC*), ambos baseados em dados estocásticos e informações dinâmicas coletadas via infraestrutura de transporte.

Conforme Giannopoulos (2004), algumas funções são esperadas para uma adequada gestão e operação de redes de transporte, como:

- Sistemas de gestão de congestionamentos e incidentes para aprimorar o controle e adaptabilidade de tráfego frente às

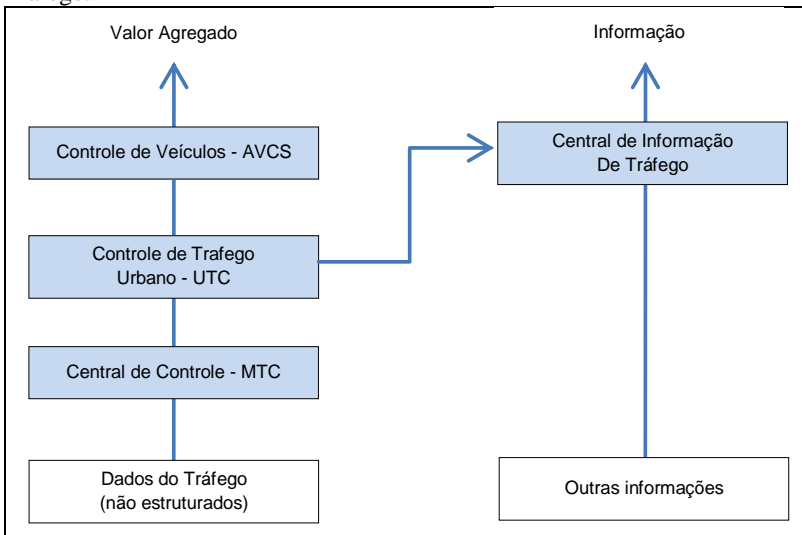
condições dinâmicas presentes no sistema de transporte, bem como a gestão de respostas emergenciais;

- Outros sistemas de gestão de tráfego baseados em inteligência artificial e métodos estatísticos;
- Estratégias operacionais para informação e orientação do usuário do sistema de transporte.

Por fim, tem-se o grupo de sistemas dedicados a executar comunicação entre a infraestrutura, veículos e usuários do sistema de transporte. Nesta área estão contidas as aplicações envolvendo questões de segurança como controle de veículo e assistência ao usuário. Estes incluem a utilização de tecnologias automáticas intraveiculares e de localização de veículos tanto com GPS, quanto com dispositivos de comunicações móveis, que permitem a comunicação entre todas as partes envolvidas como centrais de controle, usuários e veículos. Assim, neste grupo também estão inclusos os sistemas de direção autônomos que suportam controle de velocidade, alerta de colisão e evasão. São chamados de Sistema de Controle de Veículos Avançado (*Advanced Vehicle Control System – AVCS*) e utilizam sensores e atuadores eletrônicos conectados ao sistema de transporte para controlar o sistema de direção, freios e motor de um veículo (GARCÍA-ORTIZ; AMIM; WOOTTON, 1995).

A Figura 2.2 resume alguns dos componentes citados nesta seção, bem como o relacionamento e o fluxo de interação entre eles. As informações são coletadas da infraestrutura de transporte de forma desestruturada, e, à medida que trafegam entre todos os componentes, são transformados em informações úteis à tomada de decisão, gerando valor ao sistema de transporte.

Figura 2.2. Componentes de um ATMS – Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego.



Fonte: Adaptado de Giannopoulos (2004).

2.3 INFORMAÇÃO E DIRECIONAMENTO DE USUÁRIOS

Aplicações com esta característica envolvem transferir informações relevantes aos vários tipos de usuários dependentes ou interessados no sistema de transporte. Podem ser, por exemplo, indivíduos ou companhias relacionadas com a movimentação de bens e de pessoas, bem como os proprietários dos bens que estão sendo transportados. Consequentemente, isso acarreta um amplo e variado domínio de aplicações, devido à diversidade de fontes disponíveis a serem consideradas.

No entanto, isso torna a execução de viagens mais eficaz e, ao mesmo tempo, pode ajudar a praticar políticas que impactariam positivamente contra o congestionamento de veículos no meio urbano, como compartilhamento de veículos, escolha de modais ou horários de partida alternativos.

De uma forma mais específica, sistemas que proveem informação oportuna, confiável e em tempo real, podem ser úteis para personalizar viagens, assim como fornecer opções alternativas à demanda. Conduzem, ainda, a mudanças durante o percurso de rotas para evitar congestionamentos e reduzem a incerteza com relação aos tempos de

viagem (GIANNOPOULOS, 2004). Com isso, tais informações adquiridas podem ser divididas em duas categorias: pré-viagem, quando permite aos usuários envolvidos planejar viagens com base nas suas necessidades e preferências pré-determinadas e informações intraviagem, onde os usuários adaptam seus trajetos de acordo com a situação atual da rede de transporte. Estas atividades de planejamento e navegação são fundamentais para os Sistemas Avançados de Informações ao Viajante (*Advanced Traveler Information Systems – ATIS*).

Contudo, para que a informação chegue até o conhecimento dos usuários, ela deve ser transmitida através de algum canal de comunicação. Isso é possível por meio de protocolos de comunicação especiais sobre serviços de telefonia e redes sem fio ou pela Internet, os quais tornarão as informações disponíveis em terminais ou quiosques fixos, compartilhados entre usuários, ou dispositivos móveis, de caráter mais pessoal e intraveicular. Em resumo, para oferecer informação pelos canais citados, deve existir uma infraestrutura base para a coleta, processamento e gestão dos dados, bem como para a transmissão de dados e interfaces amigáveis para o usuário (GIANNOPOULOS, 2004). A seção 2.5 abordará brevemente outros aspectos deste tópico.

Ainda estão inclusos neste contexto, segundo (SLINN; MATTHEWS; GUEST, 2005), os Sistemas Cooperativos de Veículos Rodoviários (*Cooperative Vehicle Highway Systems – CVHS*) e os Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor (*Advanced Driver Assistance Systems – ADAS*), que, no futuro, lançarão mão da informação gerada pela infraestrutura de transporte e pela tecnologia embarcada nos veículos para prover uma comunicação estrada-veículo e veículo-veículo.

2.3.1 Sistemas avançados de informações ao viajante

Sistemas Avançados de Informações ao Viajante (*Advanced Traveler Information Systems – ATIS*) fornecem serviços de informações em tempo real aos usuários com a finalidade de auxiliar a tomada de decisão com respeito às viagens das diversas categorias de usuários dependentes do sistema de transporte (ADLER; BLUE, 1998; WAHLE et al., 2001). Sua função principal é sugerir rotas de forma inteligente, frente às condições, atuais ou previstas, da rede de transporte (THAKURIAH; SEN, 1996), além de outras informações pertinentes como, condições da via, situação do tráfego ou da infraestrutura disponível. Com isso, auxiliam na gestão do fluxo de veículos, além de trazerem uma série de outros benefícios como diminuir tempos de viagem, atrasos, consumo e emissão de gases.

Adler e Blue (1998) descrevem a evolução das tecnologias de informações relacionadas aos sistemas de transporte e seus usuários, fazendo um resumo da história entre as décadas de 50 até 90, mencionando duas gerações: a primeira (*Traveler Information Systems*) foi uma tentativa de utilizar os meios de comunicação para disseminação de informações de tráfego, visando minimizar o fluxo de determinados pontos da rede de transporte e também desviar de eventos específicos ou imprevistos como possíveis acidentes; já a segunda geração (*Advanced Traveler Information Systems*), se vale das novas tecnologias e são capazes de entregar informações em tempo real ao usuário, recomendando rotas de forma dinâmica. Enquanto na primeira geração os sistemas de comunicação aconteciam numa única direção, transmitindo a informação para os usuários de forma genérica, a segunda foca nas necessidades do usuário, personalizando a resposta levando em conta as condições atuais do sistema, utilizando como canais de comunicação com os usuários dispositivos como *in-vehicle route guidance systems* (IVRGS), telefones celulares, quiosques de informação e a Internet, sendo capazes de difundir a informação e receber *feedbacks* diretamente do usuário.

Essa capacidade de personalização permite que os ATIS sejam interativos e suportem geração de informações em tempo real com base nos perfis de movimentação de seus usuários, levando em conta suas preferências pessoais e objetivos específicos. Com a informação em tempo real, um usuário pode obter informações correntes das condições de tráfego, transporte público e opções de modais disponíveis, bem como descobrir o custo de utilização destes serviços. Tais características vão além de usuários isolados e veículos particulares, pois são igualmente úteis ao planejamento logístico de transporte de mercadorias e passageiros.

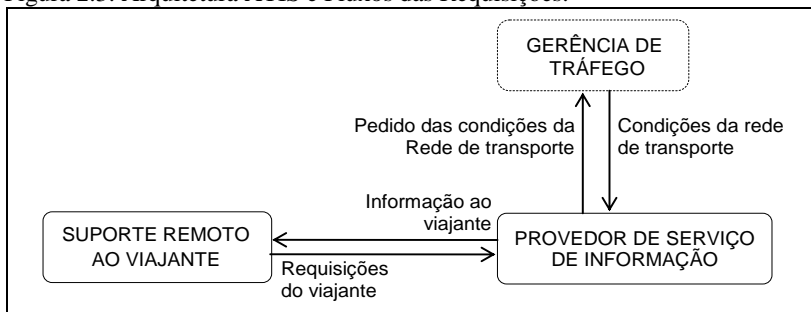
Dessa forma, Adler e Blue (1998) enumeraram algumas diretrizes para as principais propriedades avançadas dos ATIS:

- Interface com o usuário interativa: usuários podem requisitar informações, gerando uma comunicação de dois sentidos com o sistema;
- Localização de veículos e mapeamento inteligente: através do Sistema de Mapeamento Global (GPS) é possível realizar o rastreamento de veículos em tempo real;
- Busca de caminho individualizado: permite ao usuário definir seus objetivos de viagem;

- Sistema dinâmico de recomendação e orientação de rotas: geram as rotas dadas, as condições estimadas e atuais de tráfego, utilizando dados de diversos dispositivos disponíveis na rede de transporte.

Uma possível arquitetura, bem como os fluxos das requisições e respostas entre os diversos subsistemas para oferecer um serviço com as características citadas, pode ser como aquela exposta na Figura 2.3. Embora a gerência de tráfego esteja representada, ela não é parte integrante do serviço de informação ao viajante, no entanto, sua disponibilidade de informações é necessária para determinar a qualidade da informação sobre tráfego que será provida ao usuário. Não é difícil visualizar que a cooperação entre ATMS e ATIS gera o cenário onde se é capaz de informar, de forma precisa e em tempo real, as condições da rede de transporte. Principalmente, no que diz respeito às atividades de otimização de desempenho da rede (seção 2.2) e, conseqüentemente, orientação e recomendação de rotas.

Figura 2.3. Arquitetura ATIS e Fluxos das Requisições.



Fonte: o autor.

Nesse mesmo contexto de cooperação entre sistemas e visando a recomendação de rotas dinâmicas, estão os Sistemas de Orientação de Rotas (*Route Guidance Systems* – RGS). Geralmente voltados para aplicações urbanas, nestes sistemas os veículos individuais são equipados com dispositivos capazes de comunicar ao usuário qual a “melhor” rota para seguir dado o seu desejo de viagem (WATLING; VAN VUREN, 1993). Dessa forma, usuários comunicam a sua posição atual, assim como o destino desejado e, então, o sistema indica uma rota a seguir (DEFLORIO, 2003). Mei-ping, Jian e Xiao-guang (2006) complementam que o seu principal objetivo é ajudar usuários a selecionar rotas razoáveis

pelo menor custo de viagem. Este conceito se complementa ao conceito de ATIS.

Além disso, nos RGS a recomendação de alguma rota pode ser dada antes da partida, como durante a viagem (orientação do usuário) e seu cálculo pode ser realizado dentro do veículo, através de algum dispositivo, ou por meio de uma central especializada que encaminha o resultado ao veículo através dos meios de comunicação disponíveis. Sendo assim, podem ser estáticos ou dinâmicos (WATLING; VAN VUREN, 1993). No primeiro caso, recomendam-se rotas com base em condições médias ou esperadas; no segundo, chamados de Sistemas de Orientação de Rotas Dinâmico (*Dynamic Route Guidance Systems – DRG*), as rotas são geradas baseadas nas informações disponíveis em tempo real sobre a rede de transporte, de forma que as recomendações estejam sendo frequentemente atualizadas. Embora os sistemas de recomendação de rotas estáticas possam trazer respostas diversas em diferentes períodos de um dia, eles não respondem às verdadeiras condições de tráfego existentes como no caso dos sistemas dinâmicos, onde a informação pode ser constantemente atualizada.

2.4 GESTÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSPORTE

Nesta seção apresenta-se uma categoria de ITS relacionada com os serviços de transporte de mercadorias e de transporte público de passageiros. Fazem parte desta categoria os sistemas de Operações de Veículos Comerciais (*Commercial Vehicle Operations – CVO*), Sistemas Avançados de Gestão de Frotas (*Advanced Fleet Management Systems – AFMS*) e os Sistemas Avançados de Transporte Público (*Advanced Public Transportation Systems – APTS*). Esta categoria de ITS pode estar integrada e usufruir dos outros sistemas já tratados como o ATIS e o ATMS.

Geralmente voltadas ao transporte de cargas, CVO e AFMS diferem entre si pelo fato de que, segundo Crainic, Gendreau e Potvin (2009), CVO dizem respeito aos sistemas que abrangem grandes áreas (regional, nacional ou continental), enquanto que AFMS são dedicados a operações de uma instituição ou empresa em particular.

O setor de transporte de cargas oferece um vasto campo para aplicações de ITS. Giannopoulos (2004) coloca que as tecnologias de informação e os DSS são os principais instrumentos para se obter boas práticas e eficiência na operação destes sistemas de transporte. São sistemas projetados para melhorar a gestão do transporte, suportar integrações e intermodalidade, através de serviços que atuem desde o

planejamento de rotas e monitoramento da posição geográfica dos veículos, ao controle da situação dos bens e suas unidades transportadas. Sheu (2002) acrescenta que tecnologias relacionadas com CVO como sistemas de localização automática de veículos, comunicação móvel, computadores de bordo, *softwares* de roteirização e despachos dinâmicos estão tornando a operação de veículos comerciais mais sofisticada e flexível durante a última década. Características vantajosas que não se aplicam somente aos gestores do transporte de cargas, mas também aos seus clientes.

O mesmo potencial existe para os serviços de transporte de passageiros, pois podem contribuir no dimensionamento, controle e fluxo dos transportes públicos. Com base num conjunto de informações coletadas sobre a via, veículos e passageiros, pode-se inferir e influenciar a movimentação dos veículos. Isto é uma forma substancial de atuar sobre congestionamentos e melhorar o padrão de serviço nos transportes públicos (Zhang et al., 2007). Os APTS são uma grande ferramenta para otimizar o serviço de transporte como um todo, já que os dados coletados podem ser a base de pesquisa para auxiliar o dimensionamento de frotas, construção de grades de horário, previsão de demandas e tipos de transporte mais utilizados.

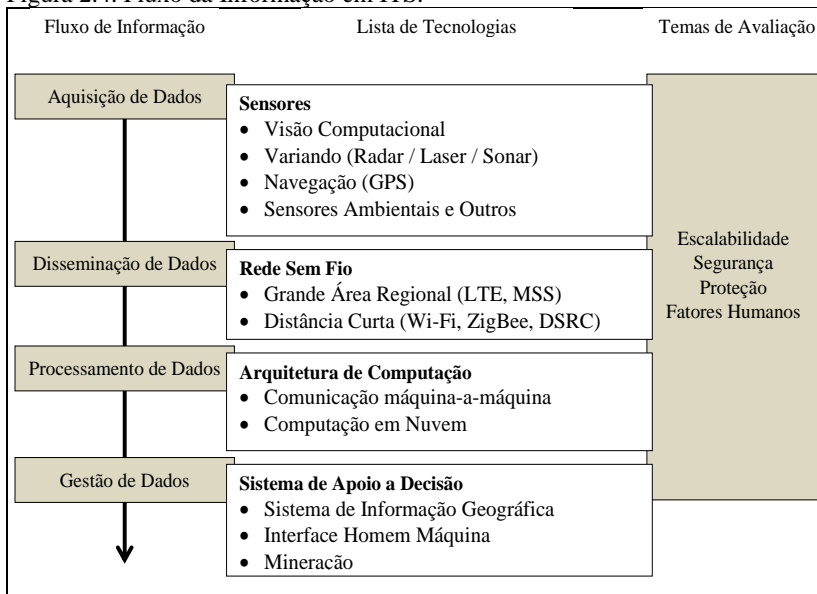
2.5 COMUNICAÇÃO E FLUXO DA INFORMAÇÃO NOS ITS

García-Ortiz, Amim e Wootton (1995) colocam que a comunicação funciona como uma cola que mantém todos os componentes de um ITS unidos. Contagens de tráfego precisam ser coletadas, o posicionamento da frota deve ser conhecido, assim como as condições da estrada. No entanto, todas estas atividades de detecção e coleta de dados de nada adiantam se a informação não puder chegar corretamente às partes interessadas. Como consequência, questões como meios físicos de transmissão e volume de dados são fatores críticos para o sucesso das operações em ITS, problemas estes relacionados ao dimensionamento da infraestrutura computacional.

O fluxo dos processos de coleta e disseminação de dados até o usuário final nos ITS envolvem mais atividades, as quais podem ser descritas em quatro etapas (Sumiła, 2012): primeiramente, os dados são coletados por meio de sensores embarcados na via, por exemplo; em seguida, são transmitidos através de algum meio de transmissão, como uma rede sem fio (*wireless*) ou fibra ótica, até uma central de processamento de dados; os dados são, então, processados e armazenados na infraestrutura computacional dessa central; por fim, uma etapa de

gestão e inteligência de dados pode ser executada para análise e tratamento dos dados e obtenção de novas informações. Este fluxo, juntamente com alguns exemplos de tecnologias utilizadas em cada etapa, é demonstrado na Figura 2.4, os quais serão melhor detalhados na seção seguinte.

Figura 2.4. Fluxo da Informação em ITS.



Fonte: Adaptado de Sumiła (2012).

2.5.1 Fontes de informação em ITS

Segundo aponta Sumiła (2012), os veículos são o maior grupo de fontes e destinatários de informação. Independente dos seus motoristas, os veículos podem informar sua posição, avisar as condições de manutenção, bem como a situação da carga que está sendo transportada, diretamente à base logística. Estas atividades são facilitadas pelos sistemas de posicionamento por satélites e redes de Internet banda larga sem fio.

Outro grupo importante para obtenção de informação em ITS é aquele composto por sensores dispostos ao longo da infraestrutura de transportes. Apesar de os sensores serem mais aplicados para funções relativas à medição do volume de tráfego, também são utilizados para medições meteorológicas, determinação da qualidade do ar e da

superfície. Aplicações utilizando sensores, geralmente transmitem a informação coletada para a central de processamento e gestão da informação. Entretanto, a informação também pode ser trocada diretamente com o veículo, após ele passar pelo sensor, como no caso das aplicações de cobrança de tarifas em pedágios e estacionamentos. Ainda entram neste grupo as câmeras de vídeo, responsáveis por funções como análise de congestionamentos e detecção de perigos na estrada (SUMIŁA, 2012).

2.5.2 Proporcionando informações aos usuários

Conforme Giannopoulos (2004), as informações disponibilizadas aos usuários se divide em duas categorias: antes da viagem (*pre-trip*), que permite planejar as jornadas com base em distintas opções e parâmetros informados; e durante a viagem (*on-trip*), provendo informações atualizadas e mensagens de confirmação que permitem aos usuários adaptarem suas rotas de acordo com atuais eventos, se necessário.

Sendo assim, a informação coletada e processada pode chegar até o usuário do sistema de transporte por meio das mais variadas interfaces de comunicação (GARCÍA-ORTIZ; AMIM; WOOTTON 1995; SUMIŁA, 2012). Os modernos dispositivos móveis, através do acesso de Internet banda larga cada vez mais disponível, possibilita ao usuário estar abastecido com informações atualizadas do sistema de transporte como um todo, desde os horários de transporte público, informações de tráfego e alertas em tempo real das condições da rede de transporte e modais.

Quiosques fixos são outras formas de disponibilizar informações, principalmente aos pedestres e usuários do sistema de transporte público, enquanto que os motoristas podem usufruir dos sistemas de informação e navegação intraveiculares, bem como dos computadores de bordo embarcados em seus veículos.

Os motoristas ainda podem obter informações úteis durante a sua viagem com mensagens disponibilizadas ao longo da via trafegada pelos *variable-message signs* (VMS). Tais ferramentas podem disponibilizar informações sobre tráfego, acidentes e condições climáticas em tempo real, além de também serem aplicados em serviços de estacionamentos (GIANNOPOULOS, 2004; SUMIŁA, 2012).

3 CAMINHOS MÍNIMOS EM GRAFOS

3.1 DEFINIÇÕES PRELIMINARES

As redes estão presentes de muitas formas no nosso dia-a-dia: redes de transporte, elétricas e de comunicação, para citar algumas. São ferramentas conceituais multidisciplinares poderosas para descrever as relações entre componentes de um sistema, presentes em praticamente todos os campos científico, social e econômico (HILLIER; LIEBERMAN, 2010; NAGURNEY; QIANG, 2012). Dessa forma, os problemas de caminhos em grafos são problemas combinatórios fundamentais aplicados à otimização de redes e que surgem como subproblemas em várias outras classes de problemas relacionados à Pesquisa Operacional, incluindo os problemas de transporte e logística.

A formulação básica e os métodos de solução de problemas de caminhos mínimos estão fortemente atrelados a definição de grafos ponderados e direcionados. Um grafo é uma estrutura $G = (V, A)$ onde os conjuntos finitos $V = \{1, \dots, n\}$ e $A \subseteq N \times N$ são, respectivamente, o conjunto de vértices e arcos deste grafo. Dados os vértices $i, j \in V$, um grafo é chamado de direcionado se cada arco for um par ordenado $(i, j) \in A$, ou seja, possui um sentido que parte de i em direção a j e é chamado de ponderado se, para todo $(i, j) \in A$, existe algum custo c_{ij} associado.

Ainda, diz-se que, para o arco $a = (i, j) \in A$, os vértices j e i são incidentes em a e são adjacentes entre si. De forma semelhante, dois vértices $a_1 = (i, j) \in A$ e $a_2 = (j, x) \in A$, são também chamados adjacentes pois compartilham o vértice j .

O grafo $P = (\{v_1, \dots, v_{k+1}\}, \{a_1, \dots, a_k\})$ é definido como um caminho se $v_i \neq v_j$ para $1 \leq i < j \leq k + 1$ e a sequência $v_1, a_1, v_2, \dots, v_k, a_k, v_{k+1}$ forma um caminho partindo de v_1 para chegar até v_{k+1} .

Em vias urbanas, os arcos são as ruas e os vértices as interseções, bem como os sentidos das vias determinam os pares ordenados e os custos podem ser dados pelos tempos de viagem ou tamanho das vias, dentre outras necessidades.

No restante deste capítulo, serão detalhadas as formulações clássicas dos problemas de caminhos mínimos, bem como alguns algoritmos importantes na literatura para solucioná-los. Será dada uma maior atenção ao algoritmo de Dijkstra, em função de sua popularidade na literatura, bem como pelo fato de ser a estratégia de solução utilizada nesta pesquisa para implementar parte da modelagem proposta.

3.2 CAMINHOS MÍNIMOS DE ÚNICA ORIGEM

Problemas de caminhos mínimos, em redes de transporte rodoviário, geralmente buscam caminhos entre pontos geograficamente distribuídos de acordo com as características conhecidas a priori sobre a malha viária. Dessa forma, a solução de um problema desse tipo traz, como resposta, o roteiro contendo quais ruas ou estradas devem ser transitadas a fim de se atingir o destino desejado a partir da origem fornecida. Ou seja, dado dois vértices s e t de um grafo, deseja-se saber a coleção de arcos desse grafo para se percorrer o caminho $s \rightarrow t$, de acordo com uma função que calcula o peso de cada aresta e define o desempenho do melhor caminho.

3.2.1 Formulação do problema

Dada uma função de custo¹ $c_{ij} : A \rightarrow \mathbb{R}^+$, que define a impedância de se atravessar um vértice (i, j) para todo $i, j \in V$, de forma que $c_{ij} \geq 0$ se $(i, j) \in A$ ou $c_{ij} = \infty$ caso contrário, o objetivo é induzir um caminho $P \subset G$ de menor custo total $\sum_{(i,j) \in P} c_{ij}$, partindo de um vértice de origem s até um vértice de destino t , onde $s, t \in V$. Este é o caso de caminhos mínimos de único critério e que pode ser modelado como um problema de programação linear da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = s \\ 0, & \text{se } i \neq s, t \ (i = 1, \dots, n) \\ -1, & \text{se } i = t \end{cases} \quad (3.2)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \ \forall (i, j) \in A \quad (3.3)$$

onde x_{ij} representa a quantidade de fluxo de forma binária que deve atravessar cada aresta (i, j) , se uma unidade de fluxo deve ser enviada, com o menor custo possível, de s para t . A restrição (3.2) define a conservação de fluxo para o tráfego dessa unidade pelo caminho P . A resolução deste problema de programação linear define um conjunto de arcos $(i, j) \in P$ para todo $x_{ij} > 0$.

¹ Neste trabalho, consideram-se, sem perda de generalidade, os pesos dos vértices como valores positivos.

3.2.2 Algoritmos de solução

O tempo computacional necessário para a resolução de problemas de caminhos em grafos por programação linear pode ser significativamente reduzido por meio de algoritmos especializados mais eficientes, principalmente no caso de redes esparsas, onde é possível evitar o problema de matrizes esparsas² utilizando estruturas de dados computacionais mais eficientes. Segundo Festa (2006), a resolução destes problemas são simples em relação a sua estrutura, ao mesmo tempo em que são ricos em intuição para aplicação de heurísticas.

A maioria dos algoritmos propostos para a solução deste tipo de problema segue uma estrutura única e genérica que, por sua vez, são uma adaptação da abordagem primal do algoritmo simplex de rede (GALLO; PALLOTTINO, 1986), também relacionados com a teoria de Programação Dinâmica (FU; SUM; RILETT, 2006).

Muitos destes algoritmos são processos iterativos e dependentes do conceito de rótulos (*distance labels*). Ou seja, durante a execução do algoritmo, um processo de rotulação é responsável por associar um valor numérico a cada vértice do grafo, representando a distância que seria percorrida partindo-se da origem até aquele ponto, através de algum caminho P . Na fase intermediária do algoritmo, cada rótulo $i \in V$ atua como uma estimativa de limite superior da distância mínima da origem s para i e, ao término do algoritmo, consolidada a distância mínima. Caso algum rótulo seja infinito, significa que um caminho ainda precisa ser encontrado ou não existe. Assim, é preciso definir condições de otimalidade capazes de determinar se o valor do rótulo representa a distância ótima.

Dado um grafo $G = (V, A)$, para todo $i \in V \setminus \{s\}$, faz-se $\Phi(i)$ denotar o rótulo de distância percorrida associado a i e faz-se $\Phi(s) = 0$. Então, $\{\Phi(i)\}_{i \in V}$ são as distâncias mínimas se e somente se

$$\Phi(j) \leq \Phi(i) + c_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.4)$$

De fato, já que os rótulos $\{\Phi(i)\}_{i \in V}$ representam a distância mínima de algum caminho P_i conectando a origem s ao vértice i , se $\Phi(j) > \Phi(i) + c_{ij}$ então o caminho obtido estendendo P_i pela aresta (i, j) será menor que P_j cujo tamanho é $\Phi(j)$. Mas para provar que (3.4) é

² Uma matriz é dita esparsa quando possui muitos elementos de valor zero, nulos ou dispensáveis. Implementa-se matrizes esparsas através de um conjunto de listas encadeadas vinculadas a elementos diferentes de zero. Assim, os elementos que possuem valor zero não são armazenados.

condição de otimalidade suficiente, considere o conjunto de rótulos $\{\Phi(i)\}_{i \in V}$ satisfazendo a condição (3.4) e faça $V_P = \{s = j_0, j_1, \dots, j_k = i\}$ o conjunto de vértices de um caminho direcionado $P = \{V_P, A_P\}$ partindo da origem s ao vértice i cujo comprimento é dado por l_P , de forma que

$$l_P = \sum_{(i,j) \in A_P} c_{ij} \quad (3.5)$$

então, a partir da condição (3.4) e assumindo $\Phi(j_0) = 0$, segue-se que

$$\begin{aligned} \Phi(i) = \Phi(j_k) &\leq \Phi(j_{k-1}) + c_{k-1k} \\ &\leq \Phi(j_{k-2}) + c_{k-2k} + c_{k-1k} \\ &\vdots \\ &\leq \Phi(j_0) + \sum_{m=1}^k c_{m-1m} \\ &= \sum_{m=1}^k c_{m-1m} = l_P \end{aligned}$$

Dessa forma, $\Phi(i)$ é um limite inferior do tamanho de qualquer caminho direcionado de s para i . Ainda, se $\Phi(i)$ for o tamanho propriamente dito deste caminho, também expressa um limite superior para o tamanho do caminho mínimo P_i , resultando que $\Phi(i)$ é o tamanho do menor caminho partindo da origem s até i .

Segundo Gallo e Pallottino (1986), a maioria dos métodos de busca de caminhos mínimos, que dependem do processamento de rótulos, podem ser derivados de um mesmo algoritmo protótipo, que permite encontrar caminhos mais curtos a partir de um vértice para todos os outros vértices de um grafo. Este algoritmo deriva um caminho $P = \{V_P, A_P\}$ de um grafo $G = \{V_G, A_G\}$ por meio da manutenção de um vetor $\{\Phi(1), \Phi(2), \dots, \Phi(n)\}$ de rótulos tal que $0 \geq \Phi(i) \leq \infty$ e que satisfaçam a condição dada na equação (3.4). Assim, um caminho P é dito ser o caminho de menor custo ligando os vértices $s, t \in V_G$ se

$$\Phi(j) = \Phi(i) + c_{ij} \quad \forall (i, j) \in A_P \quad (3.6)$$

O algoritmo inicia, então, com uma coleção $\{\Phi(i)\}_{i \in V_G}$ de rótulos e sucessivamente seleciona as arestas $(i, j) \in A_G$ que violam a condição (3.6). Para cada aresta que viola esta condição, faz-se $\Phi(j) = \Phi(i) + c_{ij}$ e termina assim que a condição estiver satisfeita para todas as arestas do grafo. Portanto, se $\Phi(j) > \Phi(i) + c_{ij}$ significa que o caminho obtido pela

expansão de P_i pela aresta (i, j) é menor que P_j cujo tamanho é $\Phi(j)$. As iterações do algoritmo irão encontrar sucessivos caminhos partindo da origem s em direção aos vários destinos $t \in V_G \setminus \{s\}$.

Finalizando a descrição do algoritmo, ainda que a busca pelas arestas que violam a condição (3.6) possa ser feita de maneira arbitrária, uma maneira mais eficiente de executar esta tarefa é lançar mão de uma lista ordenada de vértices candidatos Q , checando se a condição é violada com base nas arestas incidentes para todo $v \in Q$. A sequência de passos completa deste algoritmo protótipo está descrita na Figura 3.1.

Figura 3.1. Algoritmo Protótipo de Caminhos Mínimos.

```

Procedure generic_SP
begin
     $Q := \{1\}; \Phi(1) := 0;$ 
     $\Phi(i) := \infty; \forall i \in V; i \neq 1;$ 
    while
        Select from  $Q$  a node  $i$ ;
        foreach outgoing edge  $(i, j)$  do
            If  $\Phi(j) > \Phi(i) + c(i, j)$  then
                 $\Phi(j) := \Phi(i) + c(i, j);$ 
                Add  $j$  to  $Q$  if it does not already belong to  $Q$ ;
            end
        end
    end
end

```

Fonte: Adaptado de Festa (2006).

Existem mais de uma forma de se implementar o algoritmo, os quais se diferem, basicamente, em função do critério de escolha do próximo vértice a ser removido de Q e, conseqüentemente, nas diferentes classes de problemas de caminhos mínimos que podem resolver (FESTA, 2006). Na literatura, estes métodos são divididos por duas classes (DROZDEK, 2008; FESTA, 2006; FUN; SUN; RILETT, 2006):

- Métodos de estabelecimento de rótulos: para cada passo do algoritmo através dos vértices que ainda serão processados, um rótulo $\Phi(i)$ correspondente ao vértice $i \in V_G$ é ajustado para um valor que permanece imutável até o término da execução;
- Métodos de correção de rótulos: algoritmos dessa classe alteram qualquer rótulo $\{\Phi(i)\}_{i \in V_G}$ durante a execução de suas instruções, considerando todos os rótulos como temporários, ou seja, que podem ser alterados mais de uma vez até a última iteração, quando se tornam valores permanentes.

A grande vantagem dos métodos de estabelecimento de rótulos é que, se for necessário construir um caminho partindo do vértice de origem em direção a um único vértice de destino, o algoritmo também pode ser terminado quando o rótulo deste vértice de destino estiver determinado (FUN; SUN; RILETT, 2006). Esta operação também pode ser chamada de método de busca um para um. Fun, Sun e Rilett, (2006) ainda citam que estes algoritmos são particularmente apropriados para aplicações em Sistemas de Orientação de Rotas (*Route Guidance Systems* – RGS), motivo pelo qual esta tem sido a estratégia desta pesquisa, por meio da aplicação do algoritmo de Dijkstra, um grande representante desta classe.

3.3 ALGORITMO DE DIJKSTRA

Um dos métodos de estabelecimento de rótulos mais conhecido é o algoritmo proposto por Dijkstra no final da década de 50. Por ser um algoritmo muito estudado na literatura e amplamente utilizado em aplicações práticas, várias formas de implementá-lo vem sendo propostas e desenvolvidas, gerando uma família de algoritmos altamente especializados e eficientes para resolver problemas de caminhos mínimos (CHO; LAN, 2009; FESTA, 2006).

Durante a execução do algoritmo, os vértices do conjunto V , que serão armazenados na lista ordenada de candidatos Q , são divididos em dois grupos: vértices rotulados permanentemente e aqueles rotulados temporariamente. Com isso, um rótulo permanente associado a um vértice i representa a menor distância para o caminho $s \rightarrow i$, enquanto que um rótulo temporário define um limite superior para a distância deste caminho. O algoritmo de Dijkstra mantém uma árvore T com base numa função ρ que armazena os predecessores em T , de forma que se $(i, j) \in T$

então $\rho(j) = i$. Consequentemente, para cada vértice da árvore $(i, j) \in T$ existe um rótulo $\Phi(j) = \Phi(i) + c_{ij}$ respeitando a condição (3.6).

No início, o vértice de origem s é rotulado permanentemente com $\Phi(s) = 0$, em contrapartida aos outros vértices que são rotulados temporariamente de forma que $\Phi(i) = \infty$ para todo $i \in V \setminus \{s\}$. Isso significa que Q conterá inicialmente todos os vértices. Em cada iteração seguinte, o algoritmo remove um vértice $i \in Q$ tal que $\min_{i \in Q} \Phi(i)$, ou seja, seleciona um vértice com o menor rótulo temporário, e a partir dele, novos caminhos são testados, de forma que os rótulos temporários de cada vértice j adjacente a i é atualizado com o valor que representa a menor distância do caminho $s \rightarrow j$. Depois, i é colocado à parte e não mais usado, o que faz seu rótulo tornar-se permanente. O pseudocódigo deste algoritmo é apresentado na Figura 3.2.

O algoritmo executa dois tipos de operações: seleção de vértices da lista de candidatas Q e atualizações nos rótulos de distância. São executadas um total de n seleções e, em cada uma, o algoritmo explora os elementos de Q selecionando e removendo da lista aquele vértice correspondente ao menor rótulo temporário. Assim, o tempo de execução do Dijkstra³, na sua forma mais simples, é $O(n^2)$.

³ Entretanto, a eficiência do algoritmo de Dijkstra está intimamente ligada a estrutura de dados utilizada para representar computacionalmente o conjunto Q . Por exemplo, utilizando *binary heap* a complexidade, no pior caso, é de $O(m \log n)$; com *fibonacci heap*, o tempo de execução é de $O(m + n \log n)$ (FESTA, 2006; KORTE E VYGEN, 2006).

Figura 3.2. Algoritmo de Dijkstra.

Procedure dijkstra_SP**begin** $Q := V; \Phi(s) := 0; p(s) := s;$ $\Phi(i) := \infty; p(i) := nil; \forall i \in V, i \neq s;$ **While** $Q \neq \emptyset$ **do** $i = \arg \min_{j \in Q} \Phi(j); Q = Q \setminus \{i\};$ **foreach** *each outgoing edge* (i, j) **do****If** $\Phi(j) > \Phi(i) + c(i, j)$ **then** $\Phi(j) := \Phi(i) + c(i, j); p(j) := i;$ Add j to Q if it does not already belong to Q ;**end****end****end****end**

 Fonte: Adaptado de Drozdek (2008), Festa (2006) e Korte e Vygen (2006).

3.4 OUTROS MÉTODOS DE SOLUÇÃO PARA CAMINHOS MÍNIMOS DE ÚNICA ORIGEM

Nesta sessão, são descritos brevemente outros métodos existentes para a construção de caminhos, com a finalidade de suportar a escalabilidade e eficiência esperada para o tipo de sistema que está sendo proposto. Primeiramente, comenta-se sobre os algoritmos de correção de rótulos e, após isso, são descritas outras estratégias heurísticas para a solução de caminhos mínimos em grafos de única origem.

Segundo Fu, Sun e Rilett (2006), ao contrário do algoritmo de Dijkstra, algoritmos de correção de rótulos, também citados como métodos de busca um para todos, são mais indicados para situações onde muitos caminhos, partindo de um mesmo vértice de origem, precisam ser encontrados. Com relação a aplicações de planejamento de transportes, os mesmos autores citam que estes métodos são frequentemente utilizados quando múltiplas rotas precisam ser identificadas.

Um método simples frequentemente utilizado para este fim é o algoritmo de Bellman-Ford. Este algoritmo é o mais simples já proposto que utiliza o método de correção de rótulos para construção de caminhos

mínimos. Também proposto na década de 50, basicamente o algoritmo utiliza uma estratégia FIFO⁴ para fazer da lista de vértices candidatos Q uma fila de prioridades: um vértice é removido somente do topo da fila, ao passo que só pode ser inserido no final da mesma. Este método opera através de ciclos de execução. O primeiro ciclo consiste em executar iterações a partir do vértice de origem s . Após isso, em cada ciclo subsequente, os vértices que entram na fila Q durante o ciclo anterior, serão removidos de Q na mesma ordem que entraram. Já que nenhum caminho possui mais do que $|V| - 1$ arestas, o caminho mínimo de todo vértice pode ser obtido depois de, no máximo, $|V| - 1$ ciclos de iteração. Mais detalhes podem ser obtidos em Drozdek (2008), Festa (2006) e Korte e Vygen (2006).

Apesar dos métodos especializados, citados anteriormente, serem uma alternativa para lidar com a explosão combinatorial inerentes aos problemas de caminhos mínimos, sua eficiência computacional ainda pode ser melhorada para aplicações em tempo real onde existem grafos esparsos e poder de processamento reduzido, como é o caso dos dispositivos móveis e sistemas de orientação intraveiculares (CHO; LAN, 2009). Tal melhoria deriva do fato de que os algoritmos já descritos não utilizam nenhuma informação a priori presentes no espaço de busca, como, por exemplo, considerar a região no entorno dos vértices de origem ou de destino e concentrar a busca em ambos estes locais inicialmente. As heurísticas que partem deste princípio podem ser classificadas em: aquelas que limitam o espaço de busca e as que decompõem o problema.

A estratégia relacionada a limitar ou decompor o espaço de busca é fazer uso de algum conhecimento durante a seleção de vértices ou expansão das arestas dos caminhos, visando tornar a busca restrita a uma determinada área. Assim, espera-se que a área de busca resultante seja menor em relação a outros algoritmos (FU; SUM; RIETT, 2006). Nesta seção serão descritos dois métodos heurísticos capazes de limitar o espaço de busca: o algoritmo A^* e o método *Branch Pruning*. Com relação aos métodos que decompõem o problema, serão descritos os Métodos de Busca Bidirecional e Hierárquico.

3.4.1 Algoritmo A^*

O algoritmo A^* é fundamentado na premissa de que se deve levar em conta informações sobre a localização do vértice de destino durante a

⁴ Acrônimo do inglês para *First In, First Out*, utilizado para definir estruturas de dados do tipo filas onde o primeiro a entrar, será o primeiro a sair.

busca pelo caminho mais curto, visando limitar o espaço de busca a uma determinada região do grafo pesquisado. Este algoritmo se vale da vantagem de que um limite inferior para o custo de algum caminho, partindo de qualquer vértice em direção ao destino, pode ser calculado. Isto permite direcionar a busca pelo caminho mínimo em direção ao vértice de destino. Consequentemente, se o espaço de busca pode ser limitado, o desempenho da busca pode ser melhorado, já que deixam de serem avaliadas todas as possibilidades de vértices, como ocorre no caso do algoritmo de Dijkstra (CHO; LAN, 2009).

Cho e Lan (2009) ainda afirmam que este é um dos métodos conhecidos mais eficazes que utilizam a abordagem de espaço limitado de busca com chance de identificar uma solução ótima. Sua estrutura é semelhante ao algoritmo de Dijkstra, com exceção de dois fatores: a condição do vértice de destino ser um parâmetro indispensável e de que o método de escolha do próximo vértice a ser processado, durante as iterações do algoritmo, é baseado numa função de avaliação heurística que remove um vértice $i \in Q$ tal que $\min_{i \in Q} \Phi(i) + h(i)$, onde $h(i) : A \rightarrow \mathbb{R}$ é o custo estimado do caminho partindo de i até o destino t . Com isso, o algoritmo A^* tem como foco conduzir a expansão do espaço de busca. Para mais detalhes ver Cho e Lan (2009) e Fu, Sum e Riett (2006).

3.4.2 Método *Branch Pruning*

O conceito fundamental por trás deste método é que ele visa limitar a busca por meio do corte daqueles vértices intermediários que possuem baixa possibilidade de fazerem parte do melhor caminho entre os pontos de origem e destino. Diferente do algoritmo A^* , que mantém os vértices de baixa probabilidade na fila de busca, o método *Branch Pruning* os elimina definitivamente do processo.

Numa malha viária urbana típica, cada segmento de estrada (arcos) está geralmente conectado somente aos seus vértices vizinhos (as interseções), bem como os tempos de viagem para transitar por uma aresta são comumente vinculados aos seus tamanhos (distâncias). Isso permite restringir a busca pela área em torno dos vértices de origem e destino. Sendo assim, aqueles vértices fora dessa área são considerados dispensáveis, pois possuem pouca probabilidade de serem examinados durante o procedimento. Conforme comentam Fu, Sum e Riett (2006), este método pode reduzir o espaço de busca em 20% em relação àquele do algoritmo de Dijkstra.

Fu, Sum e Rielt (2006) colocam que o problema está em definir um espaço de busca adequado, onde seja possível se obter ganhos em tempo computacional ao mesmo tempo em que se encontra uma boa solução. O foco deste método é voltado para a etapa de seleção dos vértices e pode ser implementado seguindo a mesma forma de um algoritmo de correção de rótulos baseado no algoritmo genérico apresentado na seção 3.2.2. Uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em Fu, Sum e Rielt (2006).

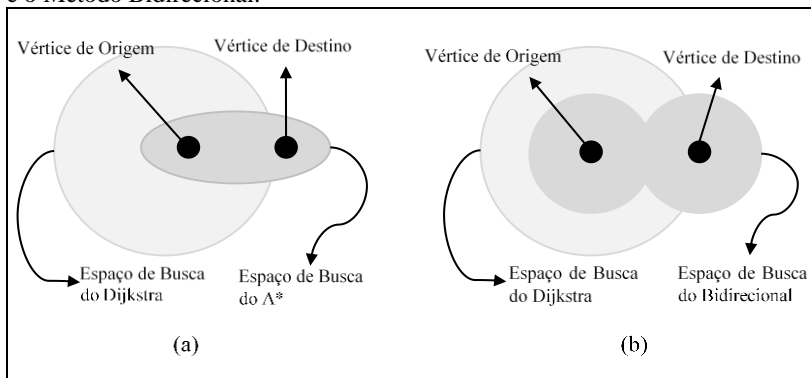
3.4.3 Decomposição do problema de busca: Método de Busca Bidirecional

O tempo computacional necessário para encontrar caminhos em grafos, partindo de uma única origem em direção a um único destino, depende do número de vértices pesquisados durante o processo de busca até se atingir o vértice de destino. Isso leva ao fato de que o esforço computacional cresce rapidamente à medida que também aumenta o tamanho do problema. Sendo assim, esta seção trata, brevemente, do método de busca bidirecional para decompor o problema em subproblemas menores, como tentativa de obter ganhos no tempo de execução.

Todos os métodos apresentados anteriormente concentram a construção de sua árvore de busca num único sentido, ou seja, são unidirecionais. Isso significa que eles exploram o espaço de busca no sentido do vértice de origem para o vértice de destino. Dantzig (1960) propôs um método de busca que divide o problema em dois processos simultâneos: enquanto um algoritmo percorre o espaço de busca em direção ao vértice de destino, o outro faz o caminho oposto, explorando em direção ao vértice de origem.

No entanto, Fu, Sum e Rielt (2006) também comentam que o desempenho deste método não é satisfatório, de forma que, tanto em eficiência computacional, como na qualidade da solução encontrada, ele é pior que o algoritmo A*. Mas, apesar do seu questionável desempenho e, consequentemente, a estratégia de busca bidirecional não ser muito promissora se utilizada isoladamente, este método é um elemento importante para as estratégias de busca hierárquicas que serão comentadas a seguir. A Figura 3.3 apresenta uma comparação entre os espaços de busca dos algoritmos citados até aqui.

Figura 3.3. Representação do Espaço de Busca e Comparação entre Dijkstra, A* e o Método Bidirecional.



Fonte: Adaptado de Cho e Lan, 2009.

3.4.4 Limitando as arestas pesquisadas: Método de Busca Hierárquico

Durante o processo de busca pelo menor caminho, o problema principal durante cada iteração de algum algoritmo de busca está centrado na identificação da melhor aresta que parte de um vértice em direção ao destino pretendido. No caso dos algoritmos citados nas seções anteriores, como o Dijkstra, por exemplo, quando um vértice é selecionado para expandir o espaço de busca, todas as arestas incidentes que partem deste vértice serão examinadas independentemente da sua importância para o resultado final, se vai estar no caminho resultante ou não. Dessa forma, a ideia básica inerente em limitar as arestas no processo de busca é evitar examinar aquelas arestas que possuem baixa probabilidade de pertencerem ao caminho ótimo. Este conceito pode ser implementado por meio de métodos hierárquicos de busca (FU; SUM; RIETT, 2006).

A estratégia do método hierárquico é dividir o problema e limitar o espaço de busca de forma que o processo de busca deve, inicialmente, se concentrar nas principais características do problema, deixando os detalhes de mais baixa importância para serem resolvidos posteriormente. Segundo Fu, Sum e Riett (2006), este método se assemelha ao comportamento dos usuários, numa rede de transporte, quando escolhem qual caminho irão executar. Uchida, Iida e Nakahara (1994) demonstraram que os motoristas preferem escolher um caminho baseado na conectividade da malha viária, familiaridade e classificação da estrada, com isso, o motorista, de forma geral, seleciona primeiro as principais

estradas próximas aos locais de origem e destino, depois selecionam as estradas que acessam a via principal ligando ambos os pontos de origem e destino (BOVY; STERN, 1990).

Entretanto, a complexidade para implementar esta heurística se deve a duas características principais: (i) como transformar o grafo representativo da rede de transporte numa estrutura hierárquica e (ii) como controlar a transição do processo de busca entre os distintos níveis hierárquicos. Exemplos de como tratar estas características podem ser encontradas em Cho e Lan (2009) e Fu, Sum e Riett (2006).

Fu, Sum e Riett (2006) comentam que métodos hierárquicos reduzem efetivamente a complexidade computacional, apesar de apresentarem maior complexidade de implementação em relação aos outros métodos já apresentados. Liu (1997) conduziu experimentos utilizando uma malha viária real de ordem de 12.697 vértices e 30.867 arestas e sua estratégia hierárquica verificou ser no mínimo 3 vezes mais rápida em relação ao algoritmo A^* , com resultados obtendo uma margem de erro em torno de 9% em relação ao resultado ótimo. Jagadeesh, Srikanthan e Quek (2002) demonstra que sua estratégia hierárquica híbrida, utilizando uma etapa de *pruning*⁵, obteve resultados até 50 vezes mais rápidos comparados a algoritmos mais comumente utilizados, como o Dijkstra, em um grafo contendo 11.742 vértices e 30.108 arestas. Os caminhos encontrados foram, em média, 3,31% maiores que os caminhos ótimos. Cho e Lan (2009), em seu método híbrido de duas camadas, trabalharam com uma proposta diferente, visando realizar experimentos com a sua estrutura embarcada num dispositivo móvel. Seus resultados, numa rede real de mais de 370 mil vértices, 500 mil arestas e executados no dispositivo, são de caminhos gerados com um tempo médio de execução em torno de 10 segundos⁶.

3.5 CAMINHOS MÍNIMOS MULTICRITÉRIO

Para o caso multicritério, considerando o mesmo grafo $G = (V, A)$, já descrito anteriormente, existe para cada arco $(i, j) \in A$ um vetor de custos associado de m componentes $c_{ij}^1, c_{ij}^2, \dots, c_{ij}^m$, de forma que existirão m funções objetivo e cada componente representará um critério como

⁵ Semelhante ao método *Branch Pruning* apresentado anteriormente.

⁶ Na época da publicação do trabalho de Cho e Lan (2009), o dispositivo móvel utilizado, chamados na época de *hand-helds*, tinha uma capacidade de processamento que variavam entre 200Mhz a 400Mhz. Atualmente, a capacidade dos dispositivos é superior a 2 Ghz em processadores contendo até 8 núcleos e memória RAM de 4 GB.

tempo, distância, grau de risco, etc. Dessa forma, para um dado caminho P unindo dois vértices $s, t \in V$, tem-se um custo total $\sum_{k=1}^m \sum_{(i,j) \in P} c_{ij}^k$ referente a cada critério que, idealmente, deve ser minimizado, isto é, de maneira utópica deve-se resolver o problema de programação linear multicritério:

$$\text{Minimizar } c^k(x) = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij} \quad \text{para qualquer } k \in \{1, \dots, m\} \quad (3.7)$$

Sujeito a

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} - \sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = s \\ 0, & \text{se } i \neq s, t \ (i = 1, \dots, n) \\ -1, & \text{se } i = t \end{cases} \quad (3.8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \ \forall (i, j) \in A \quad (3.9)$$

De forma geral, não existe uma única solução para este problema, ou, em outras palavras, não existe uma solução que otimize (3.7) simultaneamente para todo $k \in \{1, \dots, m\}$. Contudo, por se tratar de um problema multiobjetivo, o conjunto de caminhos Pareto-ótimos ou a frente de Pareto Γ pode ser determinada. Isto significa que, para cada caminho pertencente a este conjunto, não é possível determinar uma nova solução capaz de melhorar em algum critério sem que, pelo menos, um outro critério se torne pior, isto é, permaneça em equilíbrio.

Dado dois caminhos diferentes P e Q com a mesma origem partindo do vértice s até o mesmo vértice de destino t , diz-se que P domina Q se duas condições são satisfeitas: por um lado, $c^k(P)$ é inferior a $c^k(Q)$ para todo k , isto é,

$$c^k(P) \leq c^k(Q), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3.10)$$

e, por outro lado, a desigualdade é estrita para pelo menos um k . Com isso, P é um caminho Pareto-ótimo e seu vetor de custos é dito eficiente no sentido de Pareto se não existe outro caminho Q qualquer, com os mesmos vértices de origem e destino, que domine P . Evidentemente, se o vetor de custos de P é eficiente, então $P \in \Gamma$.

Sendo assim, os algoritmos de solução para o problema se concentram na busca pelas soluções que estão contidas no conjunto de caminhos Pareto-ótimos. Exemplos podem ser vistas em Soroush (2008) e Tung Tung e Lin Chew (1992). Uma formulação com definições detalhadas sobre a modelagem e dominância podem ser vistas em Martins (1984).

4 MODELO PROPOSTO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo descreve em detalhes o modelo proposto do Sistema de Transporte Dinâmico (*Dynamic Transport Information System – DTIS*), bem como seus componentes e funcionalidades definidos. Como sumarizado anteriormente, no primeiro capítulo, o principal objetivo deste DTIS é minimizar os impactos causados pelos efeitos dinâmicos na rede de transporte durante as atividades de Transporte e Logística, visando trazer ganhos relativos a todos os envolvidos. Isto será feito por meio de um sistema centralizado capaz de suportar o comportamento colaborativo entre os usuários do sistema de transporte (pedestres, motoristas e planejadores), juntamente com os diversos dispositivos conectados à infraestrutura de transporte.

Para que uma aplicação deste tipo funcione corretamente dentro do esperado, existem alguns tópicos críticos que devem ser observados:

- O sistema como um todo precisa de uma infraestrutura computacional e de algoritmos capazes de suportar muitas requisições simultâneas. Ou seja, a ferramenta proposta precisa ter escalabilidade referente à quantidade de requisições exigidas pela quantidade de usuários presentes e usufruindo do sistema;
- O modelo proposto também precisa tratar da natureza dinâmica inerente ao sistema de transporte. Precisa prover informações atualizadas às requisições, mesmo quando a rede de transporte sofre modificações frequentemente;
- Inerente aos dois tópicos anteriores, o sistema deve entregar uma resposta aos usuários com uma performance muito próxima ao do tempo real;
- Outro ponto ligado a escalabilidade é com relação a possíveis falhas na rede de comunicação. Falhas ao acesso à Internet, bem como áreas de sombra no GPS podem demandar formas alternativas para atender as requisições.

4.2 CONCEPÇÃO DO MODELO

O DTIS proposto usa a representação espacial da malha de transporte com comportamento dinâmico, incluindo rodovias ou estradas que ligam pontos geograficamente distribuídos. O termo dinâmico é

utilizado neste contexto para determinar que a rede de transporte sofre mudanças devido a diversos eventos que emergem durante um tempo contínuo. Tais eventos serão expedidos de usuário para usuário numa rede social baseada em computador, através da qual eles poderão colaborar compartilhando, validando e usufruindo das informações sobre o sistema de transporte. Conseqüentemente, eles promoverão a atualização de caminhos e isto resultará numa ferramenta capaz de resolver problemas relacionados à construção de caminhos em redes de transporte dinâmicas.

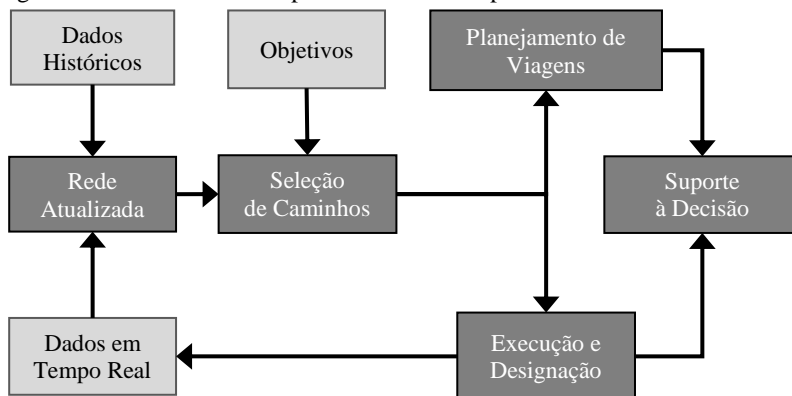
A chave para o referido comportamento colaborativo é baseada na evolução disruptiva⁷ das tecnologias de telecomunicação e computação como a chamada Computação em Nuvem e a Internet das Coisas, as quais estão transformando a maneira como nos comunicamos e estão permitindo novas possibilidades de explorar e encontrar informação. Além disso, as novas mídias sociais baseadas em computador estão nos ajudando a manter nossas relações sociais de forma mais efetiva, de modo que nos mantém atualizados sobre diversos tópicos e pessoas. Estas novas possibilidades estão embarcadas nos modernos dispositivos móveis e oferecem um canal natural e ubíquo para as interações sociais (KLEIN et al., 2013) os quais já são amplamente utilizados e comuns nos dias de hoje.

A concepção do modelo se dá, inicialmente, baseada num processo de suporte a decisão que trabalha da seguinte forma (Figura 4.1): no primeiro passo, as condições da rede são computadas utilizando informações em tempo real, bem como dados históricos das condições passadas da rede de transporte; em seguida, a condição atual da rede serve como entrada (*input*), assim como os objetivos esperados dos usuários e tomadores de decisões, em relação a solução de problemas e seleção de caminhos; similarmente, o processo de seleção de caminhos afetará os próximos passos de planejamento e execução destes. O processo de planejamento de viagens ocorrerá anteriormente ao início da viagem, enquanto que o processo de execução e designação de rotas ficará ativo, em tempo integral, após a viagem estar em andamento, caso algum caminho precise ser revisto dados os eventos de crise detectados no sistema de transporte. Estas atividades acontecerão por meio de três

⁷ Tecnologia Disruptiva ou inovação disruptiva define uma inovação tecnológica (produto ou serviço), que utiliza uma estratégia "disruptiva", em vez de evolutiva, capaz de superar uma tecnologia já preestabelecida no mercado. Que provoca ou pode causar disrupção; que acaba por interromper o seguimento normal de um processo (HORN; STACKER, 2015).

componentes principais: o Modelo de Interação Social, o Modelo de Rede de Transporte Dinâmica e o Modelo de Seleção de Caminhos.

Figura 4.1. O Processo de Suporte à Decisão Proposto.



Fonte: o autor.

Assim, pensando nas novas tecnologias como um canal para compartilhamento de informação em tempo real, apresenta-se o primeiro componente do modelo proposto. O Modelo de Interação Social (*Social Interactions Model – SIM*) será responsável por coordenar usuários através de uma rede social, ao mesmo tempo em que os controlará com base em regras de reputação e comportamento. Em outras palavras, sua principal função é assegurar a validade da informação postada no sistema, dadas as regras de conduta definidas previamente. Este componente está diretamente relacionado com o aspecto dinâmico esperado no DTIS, já que considera os usuários detectando eventos que modificam a rede de transporte. Estes usuários podem ser pessoas (motoristas, planejadores ou agentes de trânsito), qualquer dispositivo eletrônico e sistemas computacionais inteligentes conectados ao sistema de transporte. O papel deles é interagir uns com os outros e com a rede para disseminar, validar e classificar a informação sobre os eventos que afetam as condições de movimento. Suas responsabilidades podem variar de acordo com as hierarquias específicas e regras de conduta.

O Modelo de Rede de Transporte Dinâmica (*Dynamic Transport Network Model – DTNM*), o segundo componente apresentado, tem como função armazenar o grafo representativo da rede de transporte georreferenciada e todos os eventos que modificarão este grafo. Também consta no escopo deste componente, monitorar constantemente os eventos gerados pelos usuários, mas que não estão incluídos no relacionamento

social (ou seja, eventos que não são de responsabilidade da camada SIM, como o movimento e posicionamento dos veículos, por exemplo) e selecionar de forma inteligente aqueles que são importantes para alterar as condições da rede de transporte. Isto poderá alterar caminhos através da influência relacionada com a dinâmica de movimentação dos usuários.

Finalmente, o último componente é o Modelo de Seleção de Caminhos (*Path Selection Model* – PSM). Neste componente são encapsulados os algoritmos para cálculo de caminhos mínimos, bem como heurísticas e técnicas de otimização para resolução de problemas. Como seu objetivo é resolver problemas relacionados com construção de caminhos, Transporte e Logística, este componente não gera nenhum evento que possa modificar a rede propriamente dita, mas suas respostas serão completamente influenciadas pelos eventos gerados por meio dos outros dois componentes. Ele deve estar constantemente operacional, de forma que as rotas devam ser recalculadas, se um novo evento relevante for detectado pelos outros componentes.

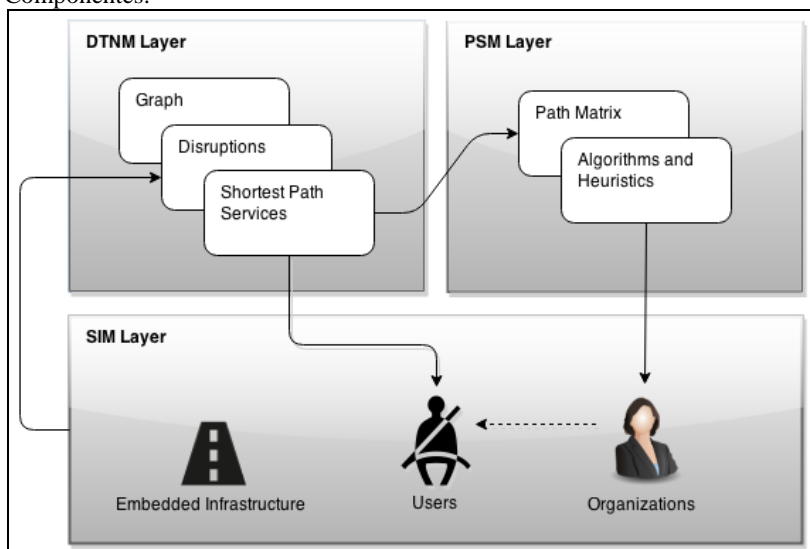
Como este trabalho não se resume em apenas encontrar caminhos mínimos dinâmicos somente para usuários simples, mas também problemas de transporte dinâmicos para organizações em geral que dependem fortemente de uma matriz de custos com base nas distâncias de viagem, há outro componente importante que afeta a escalabilidade computacional do sistema chamada de Matriz de Caminhos. Tal matriz deve ser armazenada para todos os organismos que necessitem problemas de otimização solucionados. É uma estrutura de dados computacional para representar os custos de viagem ou de transporte associados entre todos os pontos de demanda definidos para cada organização, bem como as próprias rotas para viajar entre esses pontos.

Assim, o sistema proposto pode ser organizado em camadas e sua arquitetura é aquela apresentada na Figura 4.2, onde as setas representam como estão interconectados e como a informação viaja entre eles. Isso não significa que as camadas são diretamente dependentes uma das outras, por exemplo, a camada SIM pode funcionar independentemente da camada PSM. No entanto, a camada PSM não faz sentido sozinha, pois é fortemente dependente da existência das outras duas camadas.

Ainda sobre a Figura 4.2: na camada DTNM, o grafo significa a rede rodoviária em suas representações matemáticas e computacionais necessárias para engenharia de algoritmos capazes de calcular os caminhos mais curtos, na forma de um *software*. Então, os serviços de caminhos mínimos serão responsáveis por receber os pedidos de rotas dos usuários, encaminhar a solicitação à camada PSM e posteriormente retorná-las calculadas. O componente de interrupção irá armazenar e

processar os eventos de crise detectados por todas as partes interessadas (*stakeholders*). Em seguida, a camada PSM controlará um conjunto de parâmetros necessários para resolver problemas de otimização como a Matriz do Caminho acima mencionada. Finalmente, na camada SIM, organizações e usuários estão conectados porque os usuários geralmente serão considerados como parte de um serviço de transporte de alguma empresa e os resultados serão compartilhados entre estes componentes.

Figura 4.2. A Arquitetura Proposta e o Fluxo de Informação entre os Componentes.



Fonte: o autor.

4.3 SISTEMA DE TRANSPORTE DINÂMICO PROPOSTO

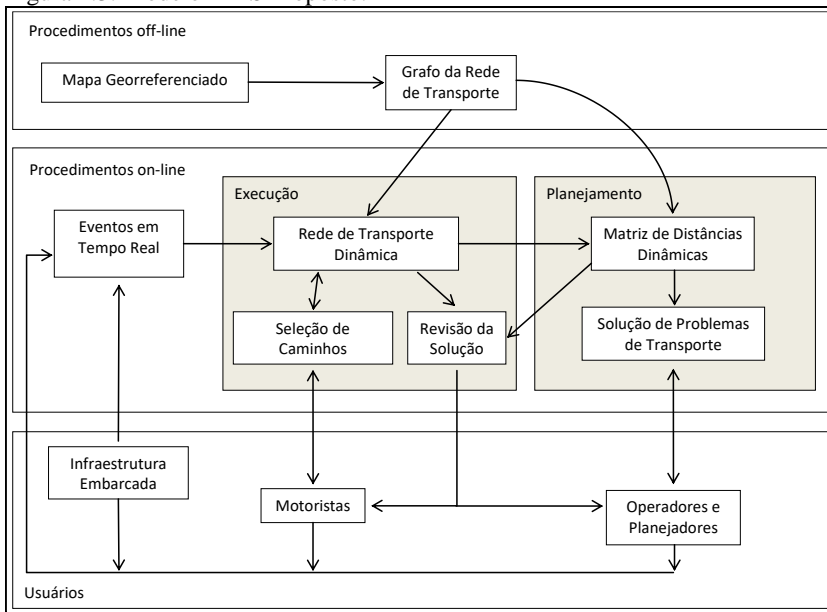
Como premissa, presume-se a existência de uma rede rodoviária representada por um grafo de forma que, para todos os seus arcos, existam dois critérios de custos de viagem não negativos, relacionados à distância ou ao tempo de viagem e a outro relacionado à probabilidade de interrupção de uma determinada via, medida na forma de um índice de risco. Por fim, supomos que todos os usuários e componentes embarcados na infraestrutura de transporte estarão sempre conectados de alguma forma por uma rede ubíqua de computadores.

Aqui, este sistema é o meio pelo qual o modelo proposto irá atuar. Com isso, as atividades que compõem o modelo proposto podem ser

divididas em atividades *off-line* e atividades *on-line*, de forma a dar suporte ao comportamento dinâmico esperado (Figura 4.3). Basicamente, as atividades *off-line* possuem uma baixa frequência de atualização dos dados armazenados. Incluem os processos de conversão do mapa georeferenciado no grafo representativo da malha viária e preparação deste grafo para as operações de transporte.

Os procedimentos *on-line* envolvem as atividades que serão frequentemente atualizadas no dia-a-dia das operações de transporte, ou seja, aquelas relativas aos eventos que ocorrem em tempo real. Seguindo a base de suporte à decisão apresentada anteriormente (Figura 4.1), as atividades *on-line* podem ocorrer nas etapas de planejamento e de execução. A etapa de planejamento diz respeito às atividades para solucionar problemas de otimização (por meio da aplicação de algoritmos e heurísticas), fora a construção de caminhos que está mais relacionada com a etapa de execução. Durante a etapa de execução ainda podem ocorrer revisões das soluções encontradas pela etapa de planejamento, de acordo com a intensidade das atualizações na rede de transporte dinâmica.

Figura 4.3. Modelo DTIS Proposto.



Fonte: o autor.

4.3.1 Rupturas na rede de transporte

As interrupções são o principal aspecto relacionado ao comportamento dinâmico esperado do modelo proposto. Sua existência consequentemente coloca todo o sistema numa condição de manutenção até a eliminação do problema. Todo evento capaz de alterar um dos critérios de custo de viagem de qualquer arco do grafo resulta em análises posteriori para descobrir, não apenas os usuários afetados, mas também as Matrizes de Caminhos que devem ser recalculadas.

Com isso, considera-se três tipos de eventos que são capazes de criar interrupções e, portanto, a crise no sistema de transporte. São eles: evidências de risco, perigo observado e eventos programados (Tabela 1).

A condição de ruptura não é a mesma para as diferentes classes de eventos, embora sua existência tenha um único resultado: colocar o sistema em status de manutenção. Enquanto o conjunto de interrupções não está vazio, o sistema está em crise. Este conjunto irá armazenar objetos geográficos que representem áreas afetadas por qualquer evento de interrupção de vias rodoviárias. Todo objeto de interrupção contém informações como a localização do evento, o tempo de aparência, o tempo de vida estimado e o índice de confiabilidade com base nos comentários fornecidos por outros usuários sobre o evento. Esse índice de confiabilidade está relacionado à confiabilidade do sistema de informações dentro da camada SIM e é abordado na próxima seção.

De um ponto de vista mais prático, relacionado à geração de caminhos, a existência de rupturas no sistema de transporte: qualquer ruptura ou barreira de viagem que surja sobre um arco (i, j) da malha viária, transforma seu custo $c_{ij} = \infty$ enquanto a barreira existir ou seu tempo de vida estimado for atingido. Sendo assim, todo caminho existente contendo o arco (i, j) ainda não percorrido precisa ser recalculado e seus usuários precisam ser informados da atualização.

Tabela 1. Classes de Eventos de Ruptura.

Evento	Característica	Exemplos
Evidências de Risco	Devido a vários dados sobre as condições ambientais ou padrões relacionados à rede de transporte coletada num horizonte temporal, um conjunto de evidências relacionadas às condições da estrada será propagado e, consequentemente, afetará os índices de risco inerentes a alguns arcos dessa rede rodoviária (como uma rede bayesiana ⁸ , por exemplo).	Contagens volumétricas ou relatórios meteorológicos são alguns exemplos de fontes capazes de gerar eventos para mudanças no índice de risco.
Perigo Observado	São os eventos que geram barreiras de viagem inesperadas durante o dia. Fortemente ligado à camada SIM, bem como à confiabilidade do sistema de informação, eles se tornaram conhecidos, já que alguns usuários os detectam e os divulgam.	Exemplos para esta classe podem ser acidentes, eventos raros ou desastres naturais.
Eventos Programados	A existência de eventos reservados segue uma certa previsibilidade ou, mais precisamente, eles poderiam ser planejados. Eles também podem ser incluídos no processo de cálculo do caminho, uma vez que eles são agendados e sua hora de início esperada é conhecida.	Todos os serviços públicos de manutenção que podem interditar as vias, como alguma manutenção prevista no sistema de água e esgoto.

4.3.2 Usuários e confiabilidade da informação

Em relação aos ITS, tecnologias de telecomunicações e computação são essenciais para a sua operação, no entanto, tão importante quanto obter a informação é obtê-la de forma completa e confiável. Cuidados devem ser tomados para evitar incompatibilidades nos modelos

⁸ Redes bayesianas definem modelos probabilísticos baseados em grafos dirigidos acíclicos. Para cada nó do grafo associa-se uma variável aleatória e uma distribuição de probabilidade condicional em função dos seus nós pais. Dessa forma, redes Bayesianas são uma forma de representação da distribuição de probabilidade conjunta das variáveis do modelo que se está representando.

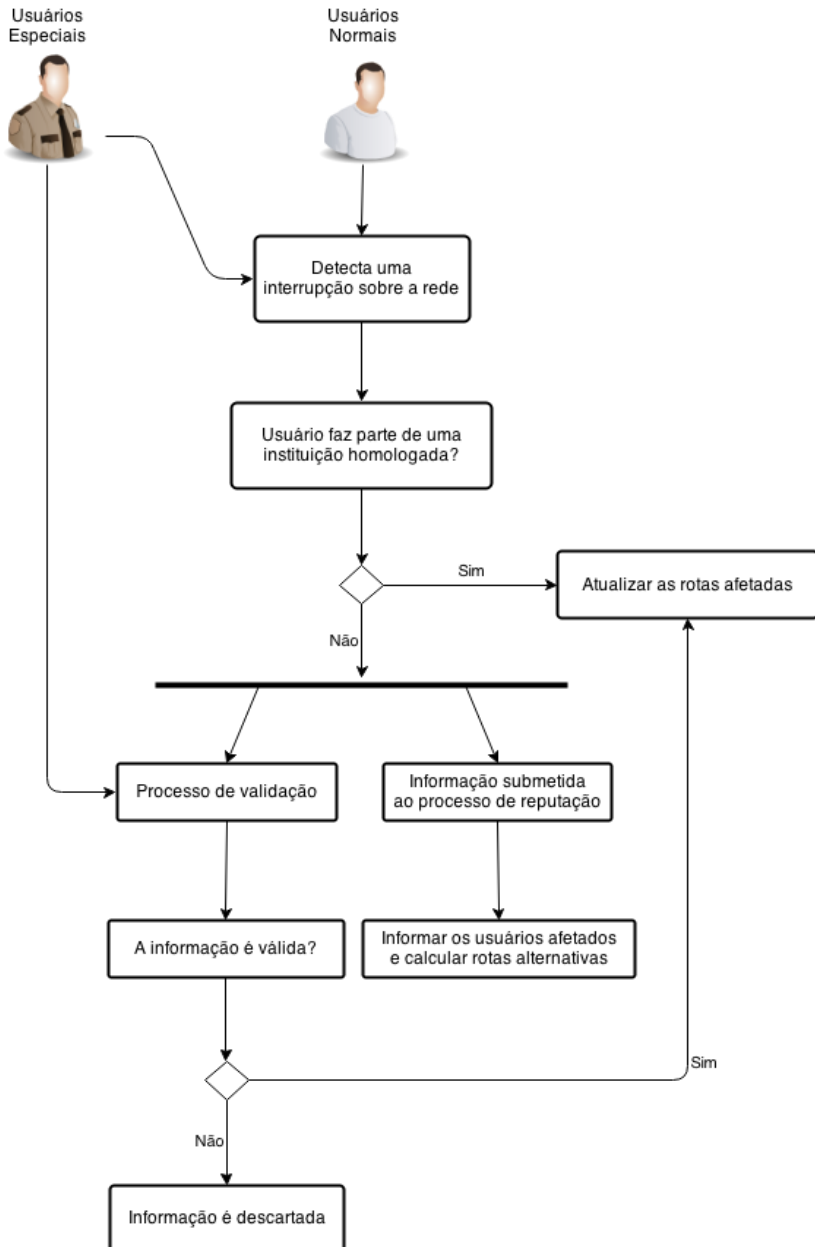
ou ruídos nas medições em tempo real, que podem ser erroneamente consideradas como falsas, dando origem a falsos alarmes (NOVAES; BEZ; BURIN, 2013; SUMİLA, 2012). Dessa forma, é possível tirar vantagem das redes sociais e sistemas de reputação com o objetivo de dar suporte ao processo de execução de rotas.

Como mencionado anteriormente, os usuários do sistema devem respeitar uma hierarquia predefinida. Ou seja, eles estão sujeitos a perfis com diferentes responsabilidades. Sendo assim, os usuários são, basicamente, divididos em duas classes: usuários normais e usuários especiais. A principal diferença entre estas duas classes é o fato de que a informação descoberta pelos usuários normais é dependente de um processo de validação para considerá-la completamente válida, enquanto que os usuários especiais podem ser pessoas de organizações confiáveis ou dispositivos embarcados na infraestrutura de transporte, considerados confiáveis para interferir diretamente na rede de transporte.

Assim, o processo colaborativo envolvido no aplicativo DTIS pode ser demonstrado por uma série de procedimentos como mostra a Figura 4.4. Nesta situação um agente externo ou usuário normal contribui com o processo de descoberta de eventos e, conseqüentemente, na atualização dos roteiros. Toda colaboração feita desta maneira deveria ser auditada e validada por agentes mais graduados para tal (como bombeiros ou policiais, por exemplo), visando filtrar as contribuições legítimas desses usuários, separando-as de conteúdo falso ou mal-intencionado. No entanto, se a validação não for necessária, após um evento ter sido detectado e propagado, ele estará sujeito as regras de validação do SIM, com base num modelo que irá inferir as condições de confiança e reputação do usuário responsável, influenciando ou não as próximas consultas por roteiros.

Apesar do processo de reputação ainda não estar sendo tratado neste trabalho, ele pode funcionar, em linhas gerais, da seguinte forma: o nível de confiabilidade de uma barreira de viagem deve ser calculado, inicialmente, de acordo com a reputação de seu responsável. Esta pontuação deve evoluir (ou não) independente da reputação do usuário responsável, assim, só depois de validada ou homologada a existência da barreira é que o seu nível de confiabilidade irá influenciar as reputações dos usuários envolvidos, as quais deverão ser recalculadas.

Figura 4.4. O Processo de Validação da Informação Descoberta pelos Usuários.



Fonte: o autor.

4.3.3 Construção de caminhos

Primeiro, para a construção de caminhos no DTIS proposto, assume-se a existência de algumas observações sobre os critérios de decisão compreendendo todos os arcos do grafo vigiados pela camada SIM. Conforme mencionado anteriormente, associado a cada arco da malha viária, tem-se um custo de viagem (definido pelas preferências do usuário, que pode ser o tempo de viagem, distância ou outro custo econômico) mais um índice de risco que representa uma medida de probabilidade de interrupção na rede rodoviária. Então, com base numa função matemática que agrupa esses dois critérios, pode-se encontrar o conjunto de vértices e arcos pareto-ótimos entre dois pontos de origem e destino através de métodos clássicos como o conhecido algoritmo de Dijkstra.

Como é possível ver nas Figura 4.2 e Figura 4.3, propõe-se duas classes de usuários capazes de solicitar caminhos: diretamente pelos usuários comuns (motoristas) e indiretamente por organizações através da camada PSM. Como resultado, a camada DTNM processa dois tipos de requisições. Pedidos para um único caminho (onde os usuários comuns poderiam usar para pesquisar viagens únicas, como uma melhor viagem de casa para o trabalho num determinado horário, por exemplo) ou solicitações da Matriz de Caminhos (permitido às empresas interessadas em obter seus resultados otimizados dado um problema de transporte específico).

Para um único caminho, uma vez que isso deve basear-se em algumas informações sobre os usuários quando o pedido é enviado ao sistema, um conjunto de parâmetros deve ser informado ao serviço de Caminhos Mínimos como a posição inicial do usuário, seu destino, bem como o nível de exposição ao risco que este usuário está disposto a assumir para viajar em qualquer rota. Então, a camada DTNM processará estas informações através de um algoritmo de busca de caminhos e, assim, entregar a melhor rota resultante entre a origem e o destino ao proprietário da solicitação. Quando surge uma interrupção que afeta algum usuário, o caminho deve ser recalculado considerando agora sua posição atual e o índice de risco atualizado associado a cada arco da rede de transporte viária.

A Matriz de Caminhos representa uma estrutura de dados computacional que não só controla os caminhos dinâmicos de alguma organização, mas também representa a matriz de custos entre todos os pontos de demanda, essencial para resolver problemas de otimização em transporte e logística. Em geral, cada organização relaciona seu conjunto

de pontos de demanda, bem como define seu nível preferencial de exposição ao risco e, em seguida, o sistema calculará e controlará dinamicamente todas as rotas Pareto-ótimas. Quando alguma empresa precisa, por exemplo, gerar sua escala de fretamentos, processa-se um pedido de resolução de problemas para a camada PSM. Neste caso, ao contrário do usuário comum, uma vez que ocorre uma interrupção que afeta alguma solução gerada ou os efeitos de interrupção são suficientemente grandes (dado um grau predefinido) uma nova solução deve ser solicitada ou apenas alguns veículos devem ter seus caminhos reconstruídos.

Então, formaliza-se o problema como: dado um conjunto de usuários do sistema de transporte U e seja a rede representativa da malha viária definida por um grafo direcionado $G = (V, A)$ onde $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ é o conjunto de vértices e $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ o conjunto de arcos desse grafo, para todo $u \in U$ existe um caminho P_{st}^u que conecta dois pontos s e t , origem e destino respectivamente, com $s, t \in V$. Sendo este caminho P_{st}^u o caminho atual de algum usuário, ele será calculado em duas situações: antes da viagem, na etapa de Planejamento e durante a viagem, na atividade de Execução e Designação (Figura 4.1).

No primeiro caso, P_{st}^u é calculado com

$$P_{st}^u = \Psi(s, t) \quad (4.1)$$

onde Ψ representa algum algoritmo selecionado para construção de caminhos mínimos. Caso alguma ruptura surja no sistema que intersecte o caminho de um veículo após este já ter iniciado sua viagem, um novo caminho $P_{st}^{u'}$ precisa ser calculado. Trata-se do segundo caso onde

$$P_{st}^{u'} = \overrightarrow{sp_u} \cup \Psi(p_u, t) \quad (4.2)$$

de forma que $\overrightarrow{sp_u} \subset P_{st}^u$ é uma partição de P_{st}^u contento o caminho entre a origem s e a posição corrente do veículo p_u do usuário u . Consequentemente, $\Psi(s, t)$ calcula o caminho remanescente para se chegar ao destino t .

Na próxima sessão, é apresentada uma proposta de modelo para construir caminhos mínimos agregando custo (tamanho dos arcos) e risco de ruptura na malha viária, visando facilitar sua aplicação e adaptação em algoritmos onde se consideram um único critério, detalhando melhor o exposto sobre a construção de caminhos de forma mais aplicável à ideia de redes dinâmicas.

4.4 CAMINHOS MÍNIMOS CONSIDERANDO CUSTO E RISCO DE RUPTURA DOS ARCOS

Na resolução de caminhos mínimos em sua forma clássica, o desempenho costuma ser medido por um único critério como, por exemplo, o tempo de viagem ou a distância e metodologias eficientes de solução para estes casos são extensivamente estudados na literatura (CHO; LAN, 2009; FU; SUN; RILETT, 2006; GALLO; PALLOTTINO, 1986). No entanto, em otimização de redes de transportes uma única função objetivo pode não ser suficiente para caracterizar adequadamente o problema (PAHLAVANI; DELAVAR, 2014; PAPINSKI; SCOTT, 2011; TUNG TUNG; LIN CHEW, 1992), principalmente em ambientes dinâmicos, em função dos múltiplos e conflitantes critérios de decisão que podem ser associados a cada arco simultaneamente como custo, tempo, energia consumida, medida de risco, etc.

Nestes casos, em razão dos vários objetivos existentes, não se busca uma única solução ao problema mas sim um conjunto de caminhos eficientes, ditos Pareto-ótimos (GRANAT; GUERRIERO, 2003; SOROUGH, 2008). Dado este conjunto de soluções, o usuário do sistema de transporte deverá escolher aquele caminho mais satisfatório. Pahlavani e Delavar (2014) ainda colocam que, não somente os problemas de caminhos mínimos mas também os modelos de tráfego baseados em somente um critério são indesejáveis em aplicações reais. Dito isto, apresenta-se a seguir a metodologia proposta.

Para cada arco $a_{ij} \in A$ que conecta o par ordenado (i, j) (com $i, j \in V$), existe um vetor de custos associado $c_{ij} = [\omega_{ij}, \rho_{ij}]$ de valores não-negativos, sendo ω_{ij} o custo de atravessar o arco (distância, tempo de viagem, etc.) e ρ_{ij} como o indicador de risco relacionado (probabilidade condicional do arco ser interrompido) tal que $0 \leq \rho_{ij} \leq 1$. Um caminho P_{st} que liga um vértice de origem s ao vértice de destino t possui, dessa forma, um custo total dado pelo vetor

$$[\Omega_{st}, \Theta_{st}] = \left[\sum_{a_{ij} \in P_{st}} \omega_{ij}, - \sum_{a_{ij} \in P_{st}} \log(1 - \rho_{ij}) \right] \quad (4.3)$$

onde Ω_{st} determina o valor total do critério de custo e Θ_{st} é uma medida da probabilidade total de não se encontrar algum arco com rupturas durante o percurso do caminho.

Conceber um caminho mínimo, dadas as condições apresentadas, é um problema multicritério que visa minimizar duas funções objetivo (bi critério). Em métodos de otimização multiobjetivo para um vetor de

custos $f(x)$, como visto brevemente na sessão anterior, busca-se a frente de Pareto Γ , a qual representa os compromissos possíveis entre os critérios existentes. Uma das formas de determinação numérica de uma frente de Pareto é através do método de agregação, onde está baseada a metodologia proposta nesta pesquisa. Tal método se fundamenta em um teorema matemático garantindo, sob certas condições, a existência de um vetor de pesos $w = (w_1, \dots, w_k)$ com $w_i \geq 0$ e $\sum_{i=1}^k w_i = 1$, tal que uma solução Pareto-ótima minimiza

$$f_w(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad , \quad (4.4)$$

isto é, se $x^* \in S$ for uma solução Pareto-ótima, então existe w tal que $f_w(x^*) = \min\{f_w(x)\}$. Este resultado supõe, em geral, que o problema de otimização multiobjetivo é convexo, mas é frequentemente utilizado em situações mais gerais. Mais detalhes podem ser vistos em Miettinen (1999).

Esta metodologia permite reduzir o problema a um único critério dado por $f_w(x)$, o que é o objetivo deste estudo. Sendo possível tal redução do problema espera-se, a partir disso, resolvê-lo aplicando algoritmos de caminhos mínimos com eficácia computacional já comprovada, respeitando ao mesmo tempo os compromissos possíveis entre risco e custo.

Dessa forma e com base no exposto para as definições de (4.3) e (4.4), bem como adotando como premissa que os valores de ω_{ij} e ρ_{ij} , definidos anteriormente estão normalizados, propõe-se calcular o custo do caminho P_{st} por meio da agregação

$$\psi_{st} = \sum_{a_{ij} \in P_{st}} \lambda_1 \omega_{ij} + \left[- \sum_{a_{ij} \in P_{st}} \lambda_2 \log(1 - \rho_{ij}) \right], \quad (4.5)$$

$$0 \leq \lambda_1 \leq 1, \lambda_2 = 1 - \lambda_1$$

onde λ_1 e λ_2 são parâmetros que ponderam o compromisso desejado entre um caminho de menor custo ou menor risco, respectivamente. A primeira parcela da equação representa, então, o custo normalizado e ponderado de se atravessar o caminho P_{st} , enquanto que a segunda parcela, relacionada ao indicador de risco, define o valor ponderado total referente à exposição ao risco deste caminho. Quanto mais próximo de 1 for o valor de λ_2 , menor será a possibilidade de exposição ao risco assumida pelo usuário. Caso $\lambda_2 = 0$, obtém-se um problema de caminhos mínimos clássico.

É importante notar que se está assumindo um conhecimento a priori do usuário do sistema de transporte a respeito do risco que ele deseja submeter-se (ou evitar expor-se) ao percorrer P_{st} . Ou seja, é de responsabilidade do usuário do sistema de transporte determinar os valores dos parâmetros λ_1 e λ_2 para os caminhos que ele deseja percorrer em função de seus pontos de origem e destino.

4.4.1 Um breve exemplo

Para ilustrar e facilitar o entendimento do método proposto, pode-se demonstrá-lo por meio de um pequeno exemplo: três usuários de uma rodovia pretendem sair do ponto A e chegar ao ponto F, considerando suas restrições pessoais de custos e segurança.

Para isso, considera-se um grafo simples como o da Figura 4.5 (a) onde para cada arco têm-se os seus valores (ω_{ij}, ρ_{ij}) definidos como o custo de travessia e a medida de risco, respectivamente. Por exemplo, o arco AB possui $(\omega_{AB}, \rho_{AB}) = (1, 0.3)$, ou seja 1 unidade de custo e 30% de chance de sofrer alguma ruptura. A Tabela 2 apresenta os valores de ω_{ij} normalizados para possibilitar o cálculo dos caminhos através da Equação (4.5).

Tabela 2. Matriz contendo os valores de ω_{ij} normalizados para aplicação do exemplo.

Vértices	A	B	C	D	E	F
A	-	0,00	-	0,00	-	-
B	0,00	-	0,50	0,75	0,25	0,63
C	-	0,50	-	-	-	1,00
D	0,38	0,75	-	-	0,88	-
E	-	0,25	-	0,88	-	0,13
F	-	0,63	1,00	-	0,13	-

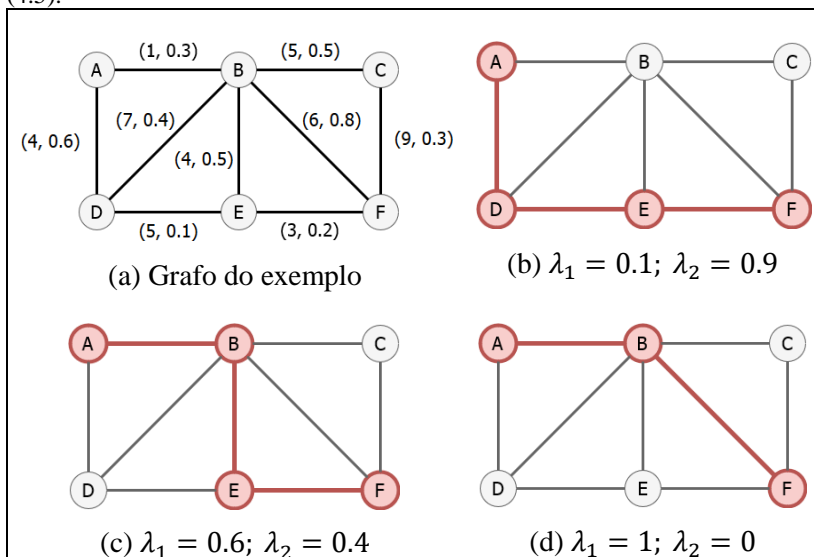
Supõe-se, dessa forma, 3 usuários com perspectivas e preferências diferentes sobre o sistema e que desejam se deslocar por este grafo, variam-se os valores de λ_1 e λ_2 para cada um deles da seguinte forma:

- **Usuário 1:** $\lambda_1 = 0.1$ e $\lambda_2 = 0.9$. Representa um usuário que prefere o caminho de maior segurança, com menor chance de encontrar problemas no trajeto;

- **Usuário 2:** $\lambda_1 = 0.6$ e $\lambda_2 = 0.4$. Já este usuário dá um pouco mais de importância para o custo, mas ainda considera um grau de segurança;
- **Usuário 3:** $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 0$. Neste caso, o usuário só está preocupado com o custo de travessia do arco, não se importando com as rupturas.

Os caminhos resultantes para este pequeno exemplo estão representados, respectivamente para cada usuário na Figura 4.5 em (b), (c) e (d). Importante ressaltar que o caminho observado na Figura 4.5 (d) só tem chance de ser obtido no caso específico onde $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 0$, ou seja, desconsiderando-se totalmente a medida de risco.

Figura 4.5. Exemplo de resultados variando os parâmetros λ_1 e λ_2 da Equação (4.5).



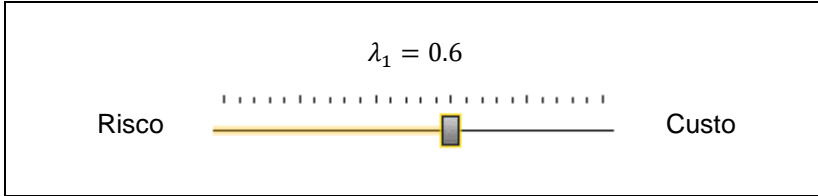
Fonte: o autor.

Este exemplo ajuda a demonstrar o funcionamento e como a utilização dos lambdas ajuda a ponderar os caminhos, de forma a manter os compromissos entre risco e custo. Os caminhos se modificam dado a quantidade de risco que um usuário está disposto a assumir quando parte para sua viagem. Desconsiderando λ_1 ou λ_2 , o problema nada mais é do que caminhos mínimos clássico.

Assim, afim de ilustrar como os usuários poderiam interpretar a relação entre os parâmetros lambdas, a Figura 4.6 ilustra um exemplo de

interface aos usuários, isto é, como os mesmos poderiam escolher suas preferências de viagem. Neste exemplo de interface, observa-se que o usuário está dando um pouco mais de preferência ao custo, pois $\lambda_1 = 0.6$.

Figura 4.6. Exemplo de interface para a relação $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$ proposta dos parâmetros.



Fonte: o autor.

5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados a implementação do método de agregação proposto na sessão 4.4 para cálculo de caminhos mínimos ponderando os compromissos entre custo e risco de ruptura nos arcos, juntamente com testes computacionais para demonstrar e avaliar seu funcionamento utilizando uma rede viária real. O modelo apresentado também será aplicado num cenário hipotético replicado, onde se fará a relação dos detalhes utilizados para desenvolvimento da ferramenta de simulação com o modelo do Sistema de Transporte Dinâmico proposto. Tanto o algoritmo de Dijkstra para calcular os caminhos mínimos, quanto o teste numérico e o simulador foram implementados na linguagem Java em sua versão 1.8, juntamente com a IDE⁹ NetBeans 8.0.

Primeiramente, no item 5.1, será apresentado o teste numérico, como foi projetado e seus resultados. Em seguida, na sessão 5.2, se mostram os pormenores de como foi implementado o simulador discreto e, finalmente, no item 5.3 são dados os detalhes do cenário simulado, bem como seus resultados.

5.1 TESTE NUMÉRICO

A fim de validar e avaliar os possíveis resultados do modelo apresentada na sessão 4.4 do capítulo anterior, um experimento computacional foi desenvolvido. Para tal, dados os pontos de origem e destino, planejou-se e empregou-se um procedimento em quatro etapas da seguinte forma:

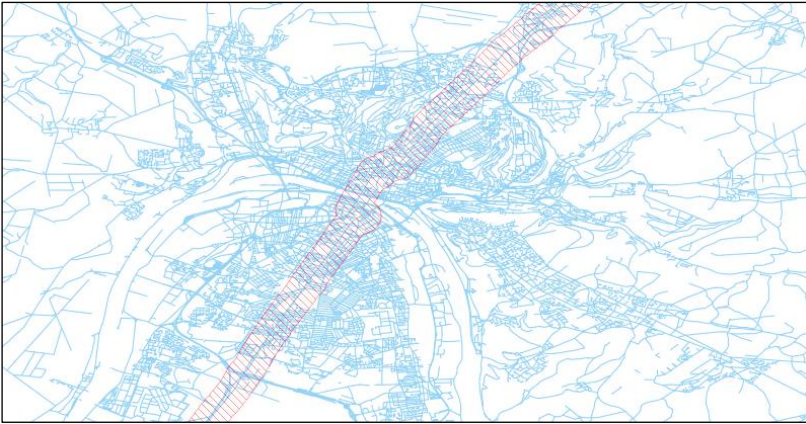
1. Inicialmente, gerou-se um conjunto de soluções S_1 variando somente os valores dos parâmetros λ_1 e λ_2 da Equação (4.5);
2. A segunda etapa consistiu em gerar um outro conjunto S_2 de soluções construídas de forma totalmente aleatórias;
3. O terceiro passo constituiu-se em encontrar, aplicando-se o filtro de Pareto, o conjunto de soluções Pareto-ótimas $\Gamma_2 \subset S_2$; e
4. Finalmente, na última etapa os conjuntos S_1 e Γ_2 foram comparados e analisados.

Além disso, foi utilizada para o cenário de estudo a rede urbana georeferenciada da região da Alta Normandia, no norte da França, o que resultou num grafo da ordem de 725.599 vértices e 1.465.160 arcos. Para

⁹ Ambiente de programação integrado para desenvolvimento de *Software*, abreviação proveniente do inglês – *Integrated Development Environment*.

cada arco, foram definidos os valores do vetor $c_k = [\omega_k, \rho_k]$, respectivamente, como o tamanho do arco (distância em quilômetros normalizada) e um indicador de risco definido aleatoriamente entre 0,3 e 0,9, dependendo da região do mapa utilizado. A Figura 5.1 exemplifica o exposto, onde na área tracejada em vermelho os valores de ρ_k variam entre 0,6 e 0,9 e fora desta área entre 0,3 e 0,6.

Figura 5.1. Parte da área estudada. A área tracejada representa a região simulada de maior risco

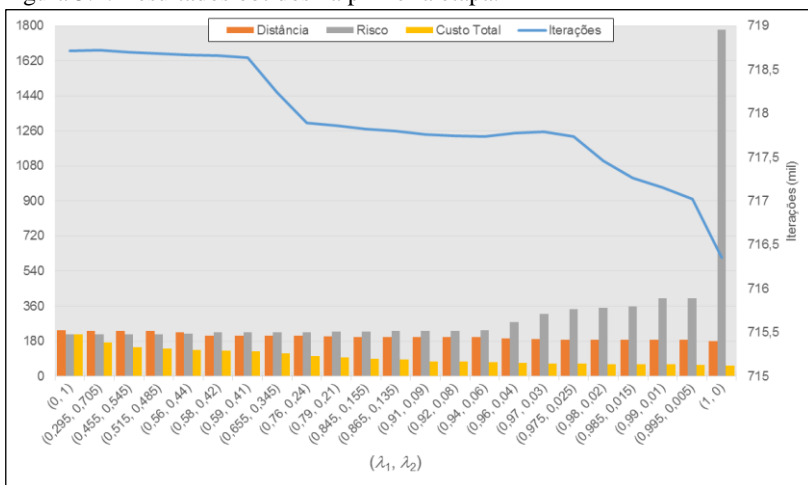


Fonte: o autor.

Para os vértices s e t do experimento, arbitrou-se dois pontos bem distantes um do outro no mapa e todos os caminhos entre eles foram gerados através do algoritmo de Dijkstra.

Para a primeira etapa do experimento, construiu-se o conjunto de soluções S_1 com os valores de λ_1 e λ_2 variando em unidades de saltos de 0.005 que totalizaram, após análise e eliminação de soluções idênticas, em 23 caminhos únicos. As faixas de valores significativos dos parâmetros, bem como os valores resultantes dos critérios distância (Ω_{st}), índice de risco (Θ_{st}) e do custo total (Ψ_{st}) obtidos, estão ilustrados na Tabela 3, bem como representados na Figura 5.2.

Figura 5.2. Resultados obtidos na primeira etapa.



Fonte: o autor.

Tabela 3. Resultados tabulados dos 23 caminhos resultantes da primeira etapa do teste numérico.

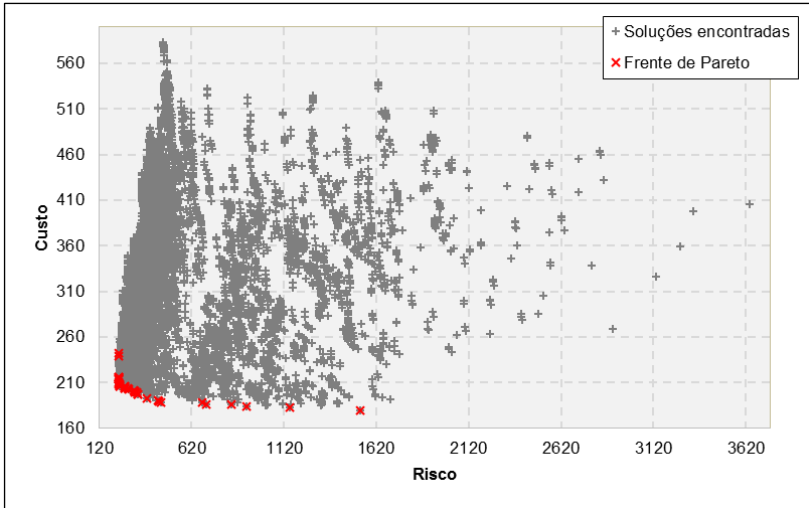
λ_1	λ_2	Iterações	Distância	Risco	Ψ_{st}
0,000	1,000	718.717	234,5401	214,0	214,000
0,295	0,705	718.720	232,1655	214,3	171,950
0,455	0,545	718.702	231,7661	214,4	148,979
0,515	0,485	718.681	231,1424	214,6	140,3511
0,560	0,440	718.669	225,1029	216,9	133,8448
0,580	0,420	718.665	207,6097	224,2	130,8531
0,590	0,410	718.638	207,3792	224,3	129,2432
0,655	0,345	718.240	207,2055	224,4	118,7707
0,760	0,240	717.891	207,1004	224,5	101,8374
0,790	0,210	717.861	203,9251	228,1	96,98717
0,845	0,155	717.821	202,7180	230,1	87,85827
0,865	0,135	717.798	202,0913	231,3	84,48844
0,910	0,090	717.757	201,9583	231,7	76,84996
0,920	0,080	717.747	201,8680	232,0	75,14702
0,940	0,060	717.741	201,0813	235,6	71,72784
0,960	0,040	717.777	195,2485	276,4	68,16708

λ_1	λ_2	Iterações	Distância	Risco	Ψ_{st}
0,970	0,030	717.795	190,4121	319,7	65,86758
0,975	0,025	717.740	188,1904	344,5	64,51916
0,980	0,020	717.458	187,5227	353,0	63,05397
0,985	0,015	717.263	187,2090	359,1	61,57202
0,990	0,010	717.153	185,4077	401,0	59,93736
0,995	0,005	717.025	185,4043	401,2	58,21479
1,000	0,000	716.355	178,3666	1.780,6	54,34692

Seguindo para a segunda fase, o procedimento adotado consistiu em gerar um conjunto de soluções alternativas S_2 , de forma que as configurações dos caminhos fossem aleatórias: dados os vértices s e t já definidos, executou-se n iterações consecutivas selecionando dois outros vértices a e b , aleatoriamente, a cada iteração e, aplicando-se o algoritmo de Dijkstra, foram construídos caminhos P'_{sa} , P'_{ab} e P'_{bt} onde, dessa forma, o custo total $\Psi'_{st} = \Psi'_{sa} + \Psi'_{ab} + \Psi'_{bt}$ para cada um dos seguintes valores de $\lambda'_1 = [1, 0.75, 0.4, 0.2, 0]$. Este processo implicou 15.739 soluções diferentes e únicas que estão plotadas na Figura 5.3, juntamente com a frente de Pareto $\Gamma_2 \subset S_2$ resultante da aplicação do filtro de Pareto da terceira etapa.

A aplicação do filtro de Pareto se deu com base no conceito de dominância de forma que, entre dois caminhos $P_{st}, P'_{st} \in S_2$, o caminho P_{st} domina P'_{st} se $\Omega_{st} \leq \Omega'_{st}$ e $\Theta_{st} \leq \Theta'_{st}$ e pelo menos uma das desigualdades é estrita.

Figura 5.3. Conjunto S_2 e a frente de Pareto Γ_2 encontrada após o filtro de Pareto.



Fonte: o autor.

5.1.1 Resultados obtidos e discussão

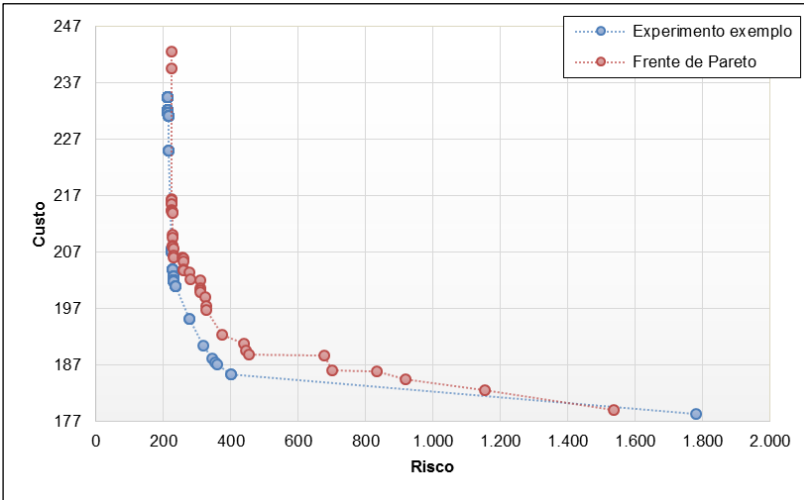
O resultado final do experimento pode ser verificado por meio da Figura 5.4, onde são comparados o conjunto de soluções S_1 , resultante da primeira etapa, com a frente de Pareto Γ_2 encontrada após o término da fase três.

Observa-se que as curvas encontradas possuem um comportamento convexo semelhante e, o mais importante, pode-se verificar que S_1 domina Γ_2 . Isto permite deduzir que, considerando o conjunto formado por todas as soluções encontradas $S = S_1 \cup S_2$ e aplicando-se o filtro de Pareto em S , obtém-se a frente de Pareto $\Gamma \subset S$ tal que $S_1 \subset \Gamma$. Ou seja, o conjunto de soluções encontradas pela primeira etapa reflete, por si só, um conjunto de caminhos Pareto-ótimos, indicando que a agregação dada por Ψ_{st} pode ser utilizada para encontrar caminhos mínimos eficientes quando se leva em consideração os compromissos possíveis entre o risco de ruptura e o custo.

Outro aspecto a notar é que as variações de λ_1 e λ_2 não alteraram muito o custo total dos diversos caminhos $P_{st} \in S_1$ obtido após a primeira etapa, ou seja, para o caso específico deste experimento, pôde-se obter caminhos com baixa exposição ao risco sem impactar significativamente

a distância percorrida pelo usuário, com exceção daquele obtido quando $\lambda_2 = 1$.

Figura 5.4. Comparação dos resultados obtidos na primeira e terceira etapa.



Fonte: o autor.

5.2 DESING DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO

A fim de permitir maior flexibilidade durante os experimentos, bem como facilitar a utilização do modelo proposto no Capítulo 4, que inclusive já foi implementado para a realização do experimento da sessão anterior, optou-se por projetar e implementar um simulador discreto e determinístico para a realização do experimento hipotético.

Dessa forma, o cerne deste simulador (Figura 5.5) foi concebido de forma que, assim que o tempo avança, gerenciam-se as rupturas previstas e presentes no sistema e, da mesma forma, controlam-se as viagens e caminhos dos veículos na simulação.

Figura 5.5. Atividades centrais concebidas no simulador.



Fonte: o autor.

5.2.1 Notação

Para a implementação do simulador, utilizou-se as seguintes variáveis, coleções e parâmetros:

Conjuntos:

- E fila de Eventos Alocados a serem processados durante a simulação;
- D pilha de Eventos Egressos, que já foram processados;
- R lista de Rupturas presentes no sistema;
- U representa uma lista de veículos (usuários do sistema de transporte) presentes na simulação;

Parâmetros:

- G grafo $G = (V, A)$ representativo da malha viária do experimento;
- a_{ij} os arcos do grafo, onde $a_{ij} \in A$, com $i, j \in V$;
- d_{ij} tamanho do arco em km¹⁰ onde $d_{ij} = \mathbb{R}^+$, $\forall a_{ij} \in A, i, j \in V$;

¹⁰ Da mesma forma como no experimento anterior: os valores das distâncias devem estar normalizados.

ρ_{ij} probabilidade do arco ser interrompido¹¹ onde $\rho_{ij} = [0, 1]$,
 $\forall a_{ij} \in A, i, j \in V$;

Rupturas:

P função de probabilidade do evento de ruptura simulado que define o valor de ρ_{ij} ;

α limite crítico para considerar um arco em ruptura em função de P ;

Y áreas da malha viária com chance de ruptura influenciadas por P , sendo $Y \subset A$;

a_r representa um arco atingido por alguma ruptura, sendo $a_r \in Y$,
 $r \in R$;

TE_r tempo de entrada de um evento de ruptura na simulação (em minutos);

TS_r seu tempo de vida estimado durante a simulação;

Veículos:

λ_1^u e λ_2^u ponderam respectivamente o compromisso entre custo e risco, onde $0 \leq \lambda_1^u \leq 1$; $\lambda_2^u = 1 - \lambda_1^u, \forall u \in U$;

L^u conjunto ordenado de pontos de demanda designados para cada veículo u mais a garagem (a missão do veículo), sendo $L^u \subset V$,
 $\forall u \in U$;

l_n ponto de demanda (destino) do veículo, com $l_n \in L^u$ e
 $n = 1, \dots, |L^u|$;

w_{ij}^u custo para percorrer um arco a_{ij} dado pelo tempo de viagem,
 $\forall u \in U$;

Ψ_{st}^n função de custo que pondera os compromissos entre distância e risco de ruptura, $s, t \in L^u, n = 1, \dots, |L^u|, \forall u \in U$;

T^u tempo de parada em cada ponto de demanda $l_n \in L^u, \forall u \in U$;

p_u posição atual do veículo (atualizada sempre a cada avanço de tempo na simulação), $\forall u \in U$;

d_u destino atual do veículo, com $d_u \in L^u$;

P_{st}^u o trajeto ($s \rightarrow t$) atual do veículo (que poderá ser modificado dinamicamente), $\forall u \in U, s, t \in L^u, t = d_u$;

VL_u velocidade média do veículo (em km/min¹²), $\forall u \in U$;

¹¹ Na forma de uma medida de risco, como descrito na modelagem do Capítulo 4, sessão 4.4.

¹² A velocidade está definida em km/min pois o tempo da simulação avança em unidades de minutos.

TE_u tempo de entrada de um evento de veículo na simulação (em minutos);
 TD_u tempo estimado de chegada do veículo em $d_u, \forall u \in U, d_u \in L^u$;

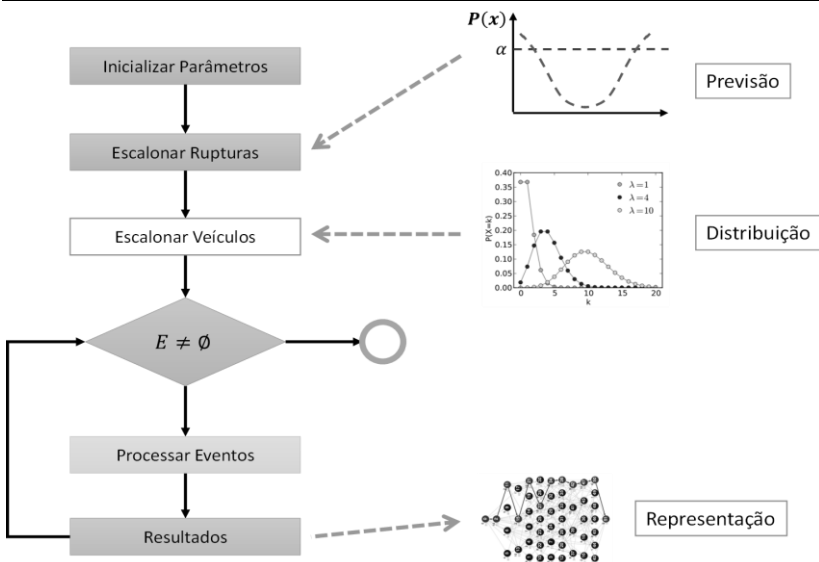
Variáveis controladas na simulação:

TA o tempo atual da simulação (em minutos);
 TD a hora do dia em função de TA .

5.2.2 Funcionamento do simulador

O funcionamento básico do simulador consiste em processar os eventos enquanto a fila de eventos não estiver vazia. Aqui considerou-se dois tipos de eventos: os eventos de rupturas e os eventos de veículos. Com isso, após o gráfico da malha viária e demais parâmetros iniciais estiverem configurados, constrói-se a fila E inicial com base num modelo de previsão de surgimento de rupturas e, de forma semelhante, os veículos são escalonados para entrar no sistema, neste caso, dada uma distribuição de probabilidade. A Figura 5.6 ajuda a resumir o exposto. Mais detalhes sobre o funcionamento dos eventos serão fornecidos a seguir.

Figura 5.6. Funcionamento básico da simulação proposta.



Fonte: o autor.

5.2.3 Processo de eventos

Enquanto a fila de eventos alocados E não estiver vazia, prossegue-se da seguinte forma:

- Passo 1.** Ordenar Eventos Alocados A fila de eventos segue uma prioridade dada pelo tempo de chegada na simulação. Assim, a fila deve ser ordenada para que siga sempre o tempo correto da simulação.
- Passo 2.** Avançar o Tempo Nesta etapa, um evento é removido de E e colocado no *slot* de evento em execução do simulador. Em seguida a posição atual de cada veículo ativo $u \in U$ é atualizada (visando posterior análise).
- Passo 3.** Executar Ações do Evento O evento que está neste *slot* é processado e uma série de ações são executadas de acordo com o seu tipo: se evento de ruptura ou de veículo.
- Passo 4.** Finalizar Evento Após todas as ações daquele evento terem sido finalizadas, ele é então inserido na pilha de eventos egressos D para posterior análise dos resultados.

O processamento da fila de eventos no simulador está relacionado com a etapa de Eventos em Tempo Real apresentado no modelo DTIS (Figura 4.3). A sessão seguinte contém os detalhes sobre cada tipo de evento projetado para este simulador, bem como fornece os pormenores das ações executadas por cada evento e suas influências no decorrer da simulação.

5.2.4 Eventos da simulação

Como é possível verificar com a ajuda da Tabela 4, dentro dos já referidos tipos de eventos (rupturas ou de veículos), têm-se um total de 5 eventos, onde 3 são exclusivos para os veículos e 2 para as rupturas.

Tabela 4. Eventos da simulação.

Tipo de Eventos	Eventos Relacionados	
Eventos de Veículo	(E1) Entrada de Veículo (E2) Chegada em d_u	(E3) Saída de l_n
Eventos de Ruptura	(E4) Entrada de Ruptura	(E5) Saída da Ruptura

Cada um desses eventos realiza um conjunto de ações pré-determinadas que influenciam os estados da simulação e serão detalhados a seguir.

5.2.5 Eventos de veículos

Estes eventos possuem relação com a camada SIM (Figura 4.2) da arquitetura de sistema proposta, pois representam os usuários do DTIS viajando pela malha viária do sistema e também com a etapa de Eventos em Tempo Real do modelo proposto (Figura 4.3), já que influenciam o sistema e dependem de informações atualizadas para se deslocarem com confiabilidade.

5.2.5.1 Entrada de Veículo (E1)

Este evento trata das primeiras atividades executadas quanto um novo veículo entra na simulação, executando as seguintes ações:

Criar um veículo

Esta ação simplesmente cria um novo veículo e o adiciona na lista de veículos U . Quando um novo veículo entra no sistema, ele é considerado ativo e pronto para se deslocar. Esta lista facilita o acesso às informações dos veículos, sua missão e rotas, bem como de seus eventos correspondentes.

Calcular a rota do veículo

Esta ação consiste na etapa de Planejamento de Viagens como descrito no processo de suporte à decisão proposto no Capítulo 4 (Figura 4.1), possuindo relação também com a etapa de Seleção de Caminhos do modelo DTIS proposto (Figura 4.3) e com a camada DTNM (Figura 4.2). Os caminhos são construídos com base no exposto no Capítulo anterior: caminhos considerando compromissos entre custo (distância) e risco de ruptura, empregando o algoritmo de Dijkstra como método para encontrar caminhos mínimos.

Assim, os cálculos dos caminhos P_{st}^u de um veículo entre os pontos de demanda s e t se dão com base na premissa de que o custo de um veículo u para atravessar um arco é

$$w_{ij}^u = d_{ij} * VL_u \quad (5.1)$$

Sendo assim, a viagem de um veículo é então determinada em função de:

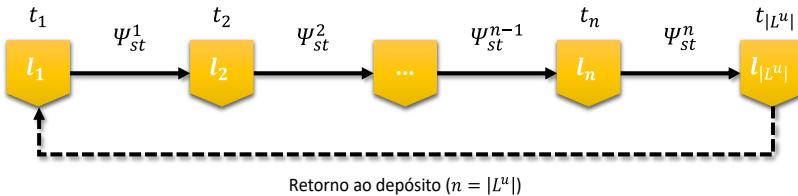
$$\psi_{st}^n = \sum_{(i,j) \in P_{st}^n} \lambda_1^u w_{ij}^u + \left[- \sum_{(i,j) \in P_{st}^n} \lambda_2^u \log(1 - \rho_{ij}) \right], \quad (5.2)$$

$$0 \leq \lambda_1^u \leq 1, \lambda_2^u = 1 - \lambda_1^u$$

para cada par $s = l_n$ e $t = l_{n+1}$ com $l_n \in L^u$ e $n = 1, \dots, |L^u|$.

Toda vez que for necessário calcular um caminho para algum veículo presente na simulação, considera-se também a medida de risco ρ_{ij} de interrupção dos arcos em função do tempo da simulação, isto é, com $\rho_{ij} = P(x)$ (melhor detalhado adiante na seção 5.2.6, com a assistência da Figura 5.10). Já a Figura 5.7 demonstra a utilização da Equação (5.2) para a construção dos vários caminhos que formam a missão do veículo para visitar todos os seus pontos de demanda.

Figura 5.7. Roteiro de viagem de um veículo na simulação.



Fonte: o autor.

Agendar Chegada em d_u

Dado o tempo estimado de deslocamento em função do tamanho do caminho do veículo e sua velocidade média, tão logo o veículo tem sua rota estabelecida, calcula-se e agenda-se a sua chegada no próximo ponto de demanda, criando-se um novo evento de **Chegada em d_u** para o veículo recém-criado com tempo de chegada dado por $TE_u = TA + TD_u$.

5.2.5.2 Chegada em d_u (E2)

Este evento representa a chegada de um veículo ao seu destino atual e, sendo assim, realiza as seguintes ações:

Verificar $d_u \neq l_1$

Se o ponto de destino atual que o veículo está visitando for, na verdade, seu ponto de origem l_1 de quando entrou na simulação, então este veículo completou sua missão e considera-se que ele voltou para a garagem, tornando-se inativo e não mais considerado durante a simulação.

Agendar Saída de l_n

Caso contrário, o veículo continua no sistema, mas estará parado em espera, por exemplo, para ser descarregado. Assim, adiciona-se um novo evento de **Saída de l_n** à fila de eventos alocados.

Veículo Parado

Como o veículo ficará um tempo parado, ele torna-se então inativo dentro da simulação, sendo desconsiderado para fins de verificação quando surgem rupturas no sistema.

5.2.5.3 Saída de l_n (E3)

Após o veículo terminar seu tempo parado no ponto de demanda l_n (seja para abastecer-se, descarregar suprimentos, ou descanso do motorista), ele deve partir para continuar sua missão em direção ao próximo destino. De forma semelhante ao evento (E1) Entrada de Veículo, este evento executa as seguintes ações:

Calcular rota

Um caminho é novamente determinado, da mesma forma como já exposto anteriormente: caminhos considerando compromissos entre custo (distância) e risco de ruptura, mais a utilização do algoritmo de Dijkstra com base na Equação (5.2).

Agendar chegada em d_u

De mesma forma ao evento (E1) Entrada de Veículo, agenda-se a chegada do veículo no próximo ponto de demanda, criando-se um evento de **Chegada em d_u** para o veículo correspondente com $TE_u = TA + TD_u$.

Ativar veículo

O veículo correspondente torna-se então ativo novamente dentro da simulação, pois estará em movimento, voltando a ser analisado quando surgirem novas rupturas no sistema.

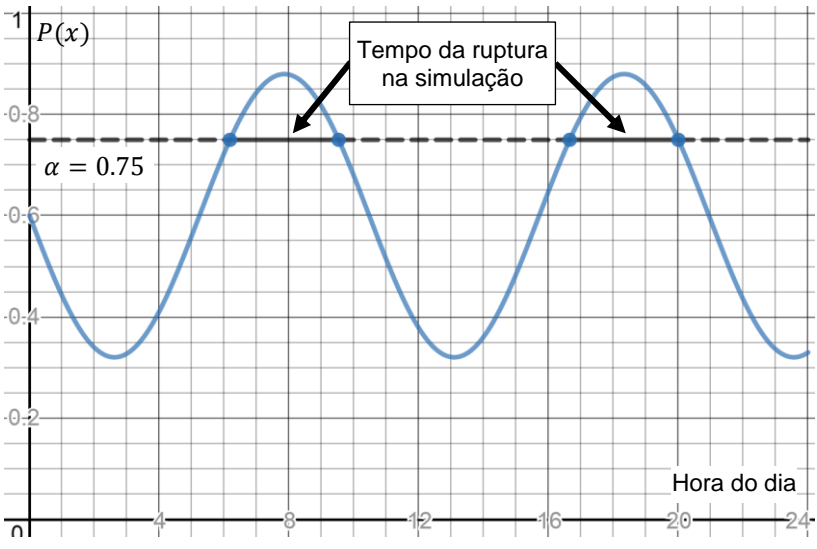
5.2.6 Eventos de rupturas

Os eventos de ruptura são escalonados para entrarem na simulação de acordo com uma função de probabilidade¹³ definida como $P = P(x)$, onde x define o evento de ruptura simulado numa determinada hora do dia, e por um limite crítico α que determina o momento previsto para o surgimento da ruptura no sistema. A Figura 5.8 ilustra um exemplo

¹³ O que configura o simulador, na forma como esta proposto neste capítulo e implementado pelo autor, como um simulador determinístico.

simples, onde, em função da curva dada por $P(x)$, têm-se dois eventos de ruptura previstos para entrar no sistema, ambos com tempo de vida determinado empiricamente de $TS_r = 03:21h$.

Figura 5.8. Determinação do surgimento da ruptura no sistema em função da probabilidade $P(x)$ e do limite α .



Fonte: o autor.

Processar eventos de ruptura está relacionado com a camada DTNM, mais precisamente com o componente de interrupção presente na arquitetura do sistema proposto (Figura 4.2), pois está se armazenando e processando os eventos de crise detectados na rede de transporte.

5.2.6.1 Entrada de ruptura (E4)

Os eventos deste tipo simulam o surgimento de rupturas no sistema de transporte que o colocam numa situação de crise. Executam as seguintes ações:

Agendar saída da simulação

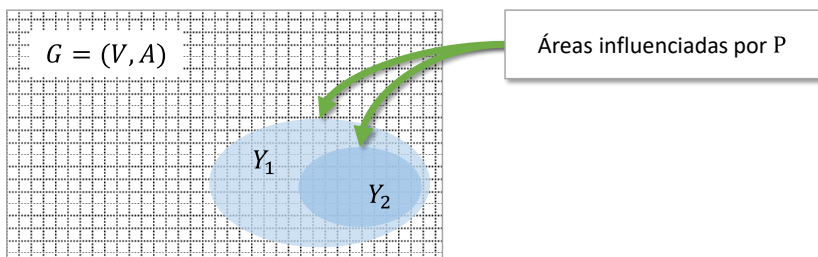
Dado o modelo de previsão das evoluções de probabilidade P , tão logo o evento de ruptura entre na simulação, agenda-se a sua saída criando-se um evento de **Saída da Ruptura** à fila de eventos alocados somando-se o tempo de entrada TE_r com o tempo de vida estimado TS_r .

Verificar se algum veículo foi afetado

Verifica-se se algum veículo ativo $u \in U$ teve a sua viagem afetada pela ruptura. Um veículo é afetado caso tenha alguma parte do seu caminho ainda não viajada afetada pela ruptura, ou seja, pertencente a área Y . Essas regiões da malha viária são fortemente influenciadas por uma função de probabilidade P e sua chance de ruptura, dessa forma, pode variar durante o dia. A Figura 5.9 exemplifica a relação entre o grafo representativo da rede de transporte com as áreas influenciadas.

Com isso, sendo a função de probabilidade $P = P(x)$ e x o evento de ruptura simulado numa determinada hora do dia, tem-se a evolução da medida de risco de interrupção dos arcos em função do tempo da simulação fazendo-se $\rho_r = P(x) \forall a_r \in Y$. Caso $\rho_r \geq \alpha$ então todo arco $a_r \in Y$ terá seu tamanho atualizado para $d_r = \infty$, isto é, estará em ruptura e deverá ser desconsiderado no algoritmo de construção de caminhos. Na Figura 5.10 apresenta-se um outro exemplo de curva para $P(x)$.

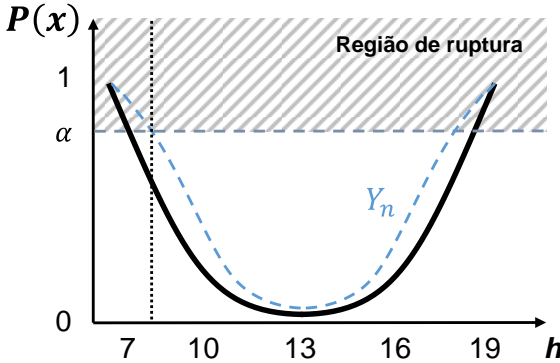
Figura 5.9. Regiões da malha viária com chance de ruptura dado por $P(x)$.



Fonte: o autor.

Aqueles veículos afetados pelos arcos em estado de ruptura terão seus caminhos alterados e recalculados, considerando agora a nova condição da rede de transporte.

Figura 5.10. Evolução da probabilidade $P(x)$ de algum evento de ruptura x em função do tempo da simulação.



Fonte: o autor.

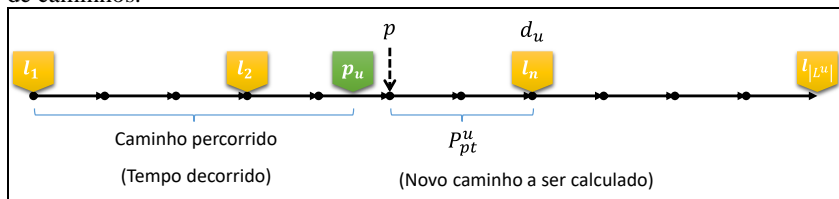
Recalcular Caminhos

Esta ação consiste na etapa de Execução e Designação descrito no processo de suporte à decisão proposto no Capítulo 4 (Figura 4.1). Tem relação com a etapa de Revisão da Solução do modelo DTIS (Figura 4.3).

Para se recalcular um caminho neste simulador, é necessário saber a posição do veículo atingido no tempo atual da simulação. Para isso, os arcos dos caminhos são processados numa sequência tal como se estivessem numa linha reta. O tamanho de cada arco é a base para se conhecer a posição de u , pois dado o tempo atual da simulação TA juntamente com a velocidade média do veículo VL_u é possível calcular a distância percorrida e, assim, saber em qual arco da rede de transporte viária ele se encontra, ou seja, a posição p_u atual de u .

Então, dado a_p como sendo o arco onde se encontra a posição p_u do veículo u no seu trajeto P_{st}^u , o próximo vértice $p \in V$ incidente em a_p é considerado para construção da atualização do caminho $P_{st}^{u'} = P_{sp}^u \cup P_{pt}^u$ de u . Dessa forma, P_{sp}^u é a parte do caminho já percorrido pelo veículo até a sua posição atual e P_{pt}^u é o novo caminho que deve ser calculado para se atingir seu destino d_u . A Figura 5.11 demonstra o exposto onde os círculos pretos são os vértices $v \in V$; as setas são os arcos $a_{ij} \in A$; e $l_n \in L^u$ são os pontos de demanda de u , com $n = 1, \dots, |L^u|$.

Figura 5.11. Representação do cálculo da posição de um veículo e atualização de caminhos.



Fonte: o autor.

Para facilitar este processo e afim de observação, sempre que se avança o tempo da simulação, as posições de todos os veículos são atualizadas.

Reagendar Chegadas em l_{n+1}

O veículo prejudicado pela ruptura sofreu uma alteração na sua viagem e, sendo assim, seu evento de chegada no próximo ponto de demanda precisa ser reagendado na simulação.

5.2.6.2 Saída da Ruptura (E5)

Este evento representa a remoção de uma ruptura do sistema e, diferente dos anteriores, executa somente uma ação:

Verificar Veículos e Recalcular Caminhos

De forma inversa ao evento (E1) Entrada de Ruptura, neste caso, verifica-se quais veículos ativos $u \in U$ podem ser beneficiados com a saída da ruptura do sistema. Sendo assim, logo que uma ruptura é removida da simulação e deixa de influenciar o sistema de transporte, procura-se por veículos que, por ventura, reduzam sua função de custo considerando agora os arcos que antes estavam impedidos para trânsito, considerando a sua posição atual.

No caso desta ação, um veículo só recebe um novo caminho caso obtenha vantagens com essa mudança, diferente do evento (E1) Entrada de Ruptura onde o veículo obrigatoriamente deve receber um novo caminho se alguma ruptura o afeta. Isto é, P_{st}^u só é atualizado para $P_{st}^{u'} = P_{sp}^u \cup P_{pt}^u$ caso $\Psi_{st}^n \geq \Psi_{st}^{n'}$.

Um novo caminho é analisado e determinado da mesma forma como já exposto anteriormente: caminhos considerando compromissos entre custo (distância) e risco de ruptura, mais a utilização do algoritmo de Dijkstra com base na Equação (5.2). Tem relação com a etapa de Revisão da Solução do DTIS (Figura 4.3).

5.3 EXPERIMENTO HIPOTÉTICO

Nesta sessão serão aplicados todos os conceitos propostos até então nesta pesquisa e a execução do simulador propriamente dito, juntamente com o método proposto de caminhos mínimos considerando os compromissos entre custo e risco de ruptura. Aqui serão apresentados os detalhes do cenário simulado (sessão 5.3.1), bem como os parâmetros de entrada para execução dos experimentos (sessão 5.3.2). Os resultados obtidos serão comentados no item 5.3.3.

5.3.1 Apresentação de cenário simulado

O evento de ruptura que será utilizado no cenário hipotético é o fenômeno de *verglas*, um termo em francês que pode ser traduzido como geada e, por ser bastante relacionado com as estradas, também pode ser colocado como gelo na pista.

A chuva “verglaçante” ocorre quando chove a temperaturas muito baixas. A água congela ao entrar em contato com qualquer superfície sólida tornando-as muito escorregadias e perigosas. Calçadas e ruas são revestidas por uma fina camada de gelo transparente e, como há pouco ar no espaço entre o gelo e a superfície, o *verglas* reflete pouca luz e mantém a superfície no seu aspecto original, o que o torna difícil de ser percebido. Isso, certamente, aumenta o risco de acidentes com automóveis e exige atenção redobrada dos motoristas e pedestres. Sendo assim, a chance deste fenômeno ocorrer aumenta se há previsão de diminuição da temperaturas e ocorrência de precipitação. A Figura 5.12 ilustra um alerta das autoridades sobre o fenômeno em rodovias francesas.

Figura 5.12. Ilustração do fenômeno no cenário hipotético.



Fonte: o autor.

Para tal, foi considerada então a mesma malha viária georeferenciada utilizada no experimento anterior: região da Alta Normandia, ao norte da França (Figura 5.13). Região que desenvolveu um sistema de meteorologia moderno e confiável, que monitora os fenômenos e emite alertas constantes sobre as intempéries aos habitantes. Isso pode ser considerado um *input* à Rede de Transporte Dinâmica, contribuindo para as informações em tempo real úteis aos usuários do sistema (os Eventos em Tempo Real descritos na Figura 4.3).

Tabela 5. Parâmetros dos Veículos.

Veículo $u \in U$	TE_u *	L^u **
1	360	1, 2, 3, 4
2	590	5, 6
3	613	7, 8, 9, 10
4	757	2, 3, 11
5	901	12, 13, 14, 15

(*) Tempo decorrido em minutos.

(**) Roteiro já ordenado.

Assume-se que os veículos já possuem seus roteiros determinados previamente ao entrarem na simulação e, assim, a lista L^u de pontos de demanda já está ordenada através da resolução de um problema de roteirização de veículos, bastando somente executar a construção de caminhos entre estes pontos.

Outros parâmetros definidos para o experimento com relação aos veículos:

- $VL_u = 60 \text{ km/h}$ Velocidade média igual para todo veículo $u \in U$;
- $T^u = \text{rand}(30, 120)$ Tempo parado em cada ponto de demanda, onde a função $\text{rand}(x, y)$ retorna um valor randômico entre x e y , isto é, definidos empiricamente entre 30 minutos e 2 horas no caso deste experimento, $\forall l_n \in L^u, u \in U$.

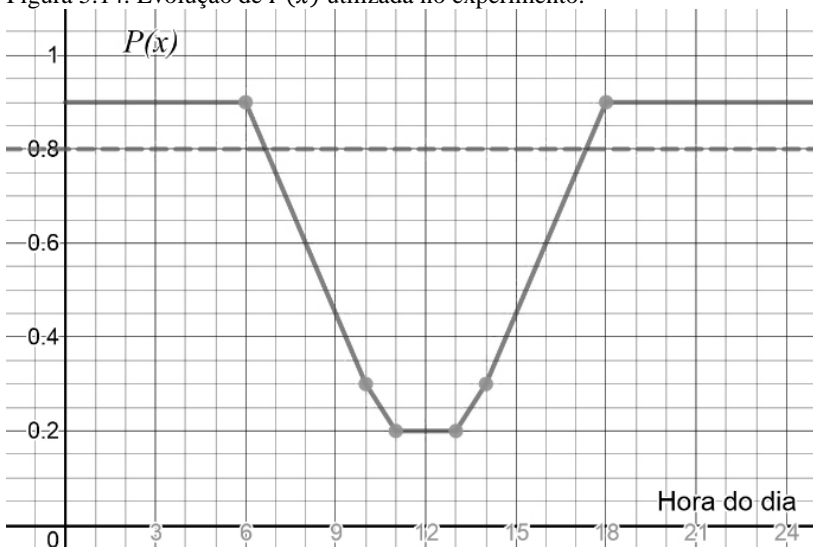
5.3.2.2 Comportamento da curva de ruptura

Para representar o fenômeno de *Verglas* na simulação, definiu-se empiricamente a curva de $P(x)$ como a função ilustrada na Figura 5.14, bem como $\alpha = 0.8^{14}$. Este comportamento foi definido dessa forma pois, em resumo, conforme a temperatura aumenta durante o dia, diminui-se a

¹⁴ Definiu-se este valor de α , pois considerou-se este o limite para ocorrência de acidentes, ou seja, acima deste valor a chance de derrapagens é muito grande.

chance de ruptura¹⁵. Ressalta-se, por fim, que a área afetada pela chance de ruptura Y é a região destacada na Figura 5.13, também definida empiricamente¹⁶.

Figura 5.14. Evolução de $P(x)$ utilizada no experimento.



Fonte: o autor.

5.3.3 Resultado da simulação

O experimento foi conduzido da seguinte forma: variando-se os valores do parâmetro¹⁷ λ_1^u e analisando-se os resultados obtidos para todos os veículos com relação ao seu tempo de permanência na simulação¹⁸, quantidade de veículos na simulação, veículos afetados e consequências nos roteiros. Os valores obtidos podem ser observados na

¹⁵ Não é objetivo deste trabalho entrar nos detalhes sobre previsões meteorológicas e dos índices de risco.

¹⁶ Com base no que pôde ser visto em <http://actualite.lachainemeteo.com/actualite-meteo/2017-01-02-19h49/alerte-neige---la-situation-en-direct-31650.php>.

¹⁷ Ressaltando a regra dada de que $\lambda_2^u = 1 - \lambda_1^u \forall u \in U$. Assim, se $\lambda_1^u = 1$ dá-se atenção exclusiva ao custo e se $\lambda_1^u = 0$ busca-se caminhos que evitem qualquer risco.

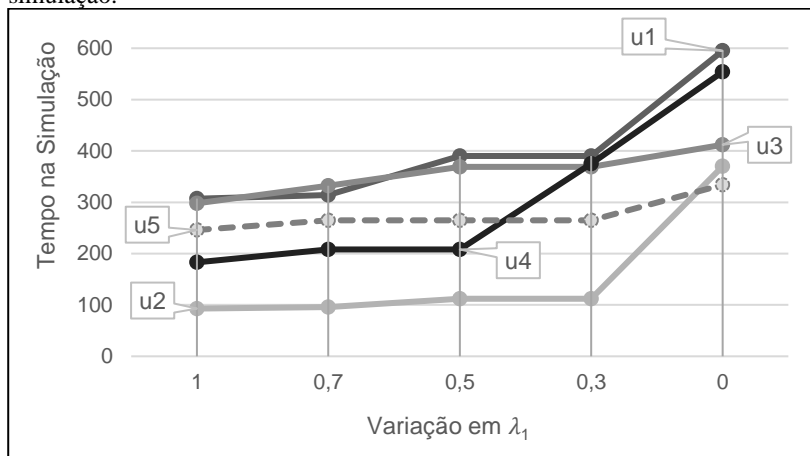
¹⁸ O tempo de permanência do veículo na simulação, na verdade, representa seu tempo transitando pelo sistema de transporte, isto é, desconsiderando seus tempos parados T^u , pois nestes momentos os veículos não podem ser afetados pelas rupturas.

Tabela 6 e estão plotados na Figura 5.15, para facilitar a comparação e análise das consequências sobre o tempo dos veículos na simulação em função da preferência entre custo e risco de ruptura.

Tabela 6. Tempo de permanência dos veículos na simulação pela variação de λ_1^u .

Valores de $\lambda_1^u \forall u \in U$	Tempo de Permanência dos Veículos (em min.)				
	u1	u2	u3	u4	u5
1	307	93	298	183	246
0,7	314	96	332	208	265
0,5	390	112	369	208	265
0,3	390	112	369	375	265
0	595	370	412	554	334

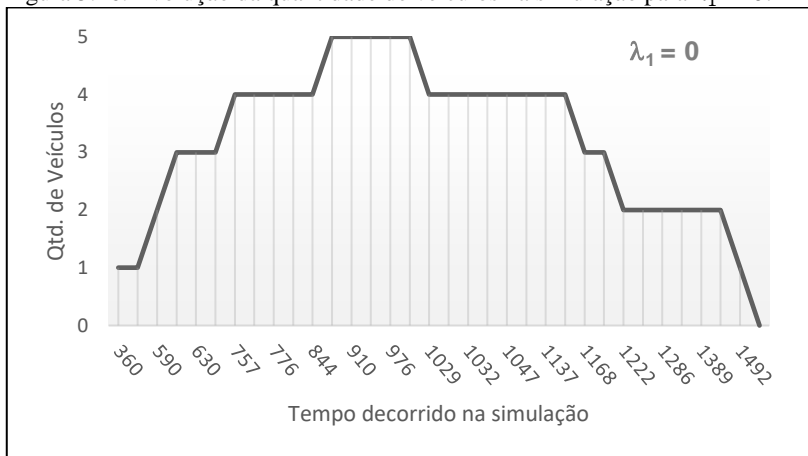
Figura 5.15. Comparação entre os tempos de permanência dos veículos na simulação.



Fonte: o autor.

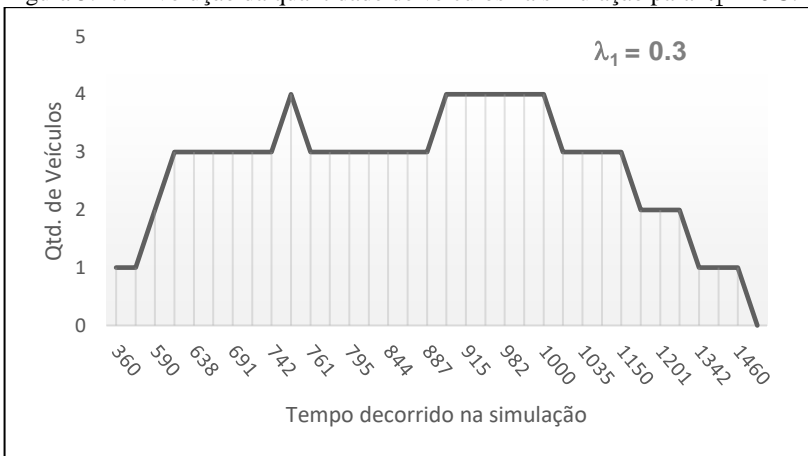
Entre a Figura 5.16 a Figura 5.20 vê-se a evolução da quantidade de veículos na simulação para os diferentes valores de λ_1^u . A quantidade de veículos na simulação também é influenciada pelos tempos parados, que são definidos randomicamente a cada execução.

Figura 5.16. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0$.



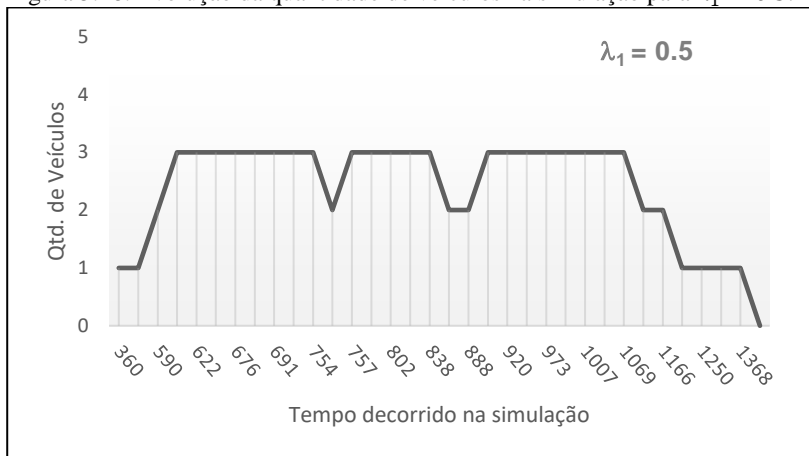
Fonte: o autor.

Figura 5.17. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0.3$.



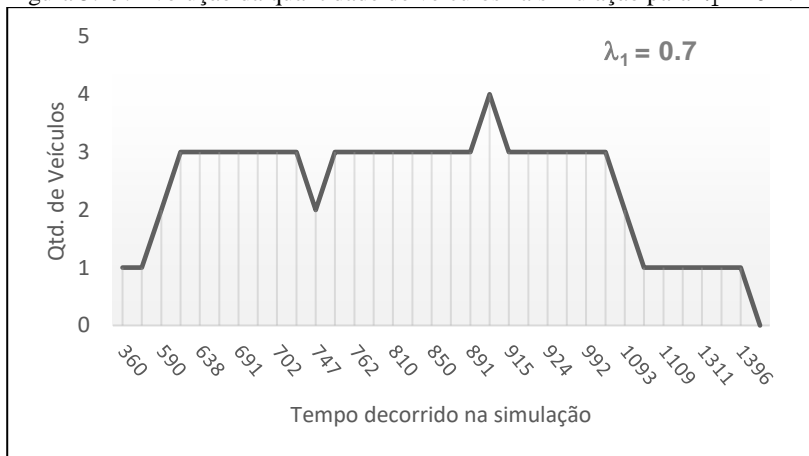
Fonte: o autor.

Figura 5.18. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0.5$.



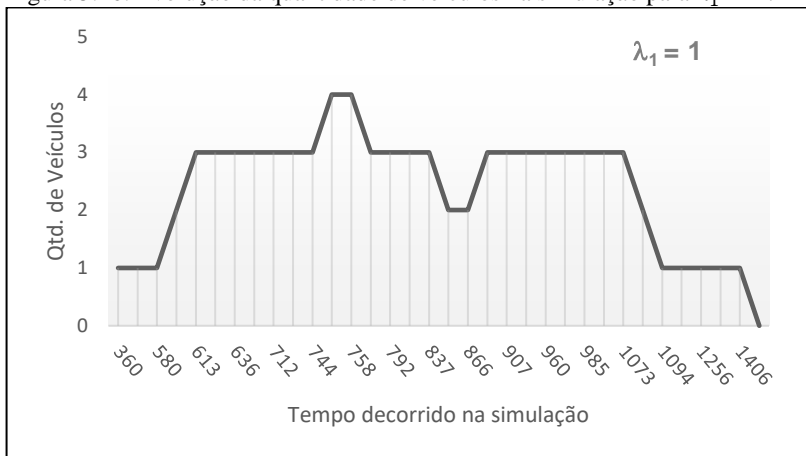
Fonte: o autor.

Figura 5.19. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 0.7$.



Fonte: o autor.

Figura 5.20. Evolução da quantidade de veículos na simulação para $\lambda_1 = 1$.



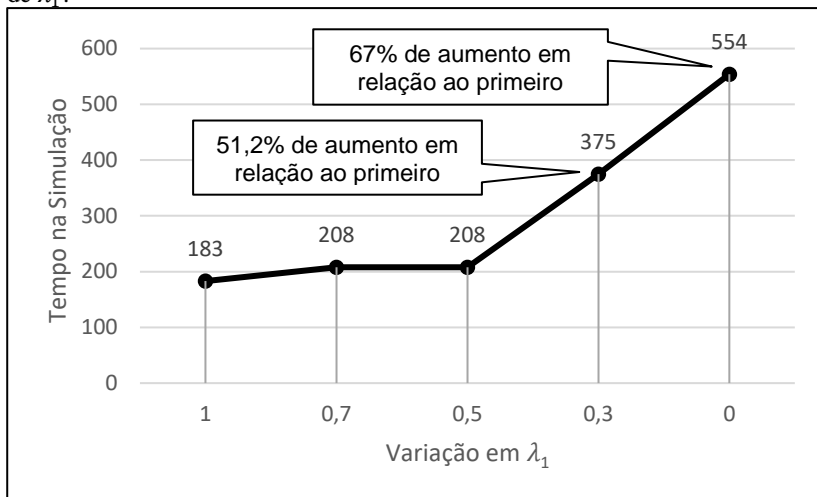
Fonte: o autor.

Para se analisar os efeitos causados pela influência da curva da ruptura de forma mais detalhada na simulação, selecionou-se o veículo 4 para comparar como seu roteiro se modifica com a variação de λ_1^u no tempo decorrido de simulação. Este veículo foi selecionado pois seu tempo de permanência foi modificado consideravelmente em relação aos outros, como se pode ver com a ajuda da Figura 5.15 e da Figura 5.21, modificando seu tempo em torno de 67% comparando-se o último experimento com o primeiro experimento.

Nas Figura 5.22 até a Figura 5.20 é possível observar as alterações ocorridas nos roteiros do veículo selecionado: em verde tem-se o primeiro trajeto ($l_2 \rightarrow l_3$); em laranja, tem-se o segundo caminho ($l_3 \rightarrow l_{11}$); e, em vermelho, o retorno à garagem ($l_{11} \rightarrow l_2$).

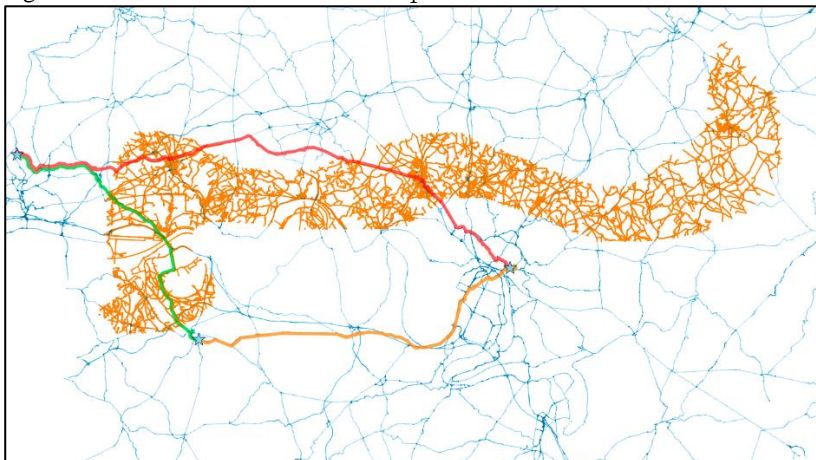
Nota-se que o veículo executa os devidos desvios conforme λ_1^u tende a zero e também que o veículo transita pelas regiões de risco em função da quantidade de risco que ele está disposto a assumir como se pode ver na Figura 5.23 e Figura 5.24. Já na Figura 5.22 o risco é desconsiderado e o veículo faz o caminho mínimo clássico e, na Figura 5.25, todos os caminhos calculados em qualquer momento da simulação evitam áreas de risco.

Figura 5.21. Tempos de permanência na simulação do veículo 4 pela variação de λ_1^u .



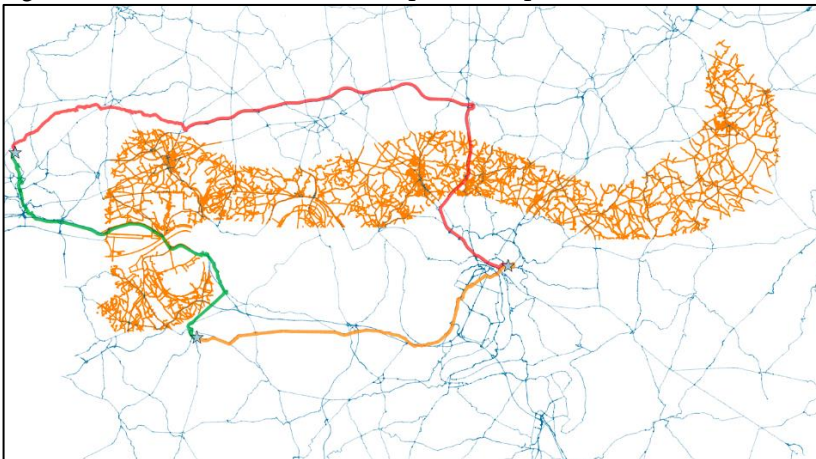
Fonte: o autor.

Figura 5.22. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 1$.



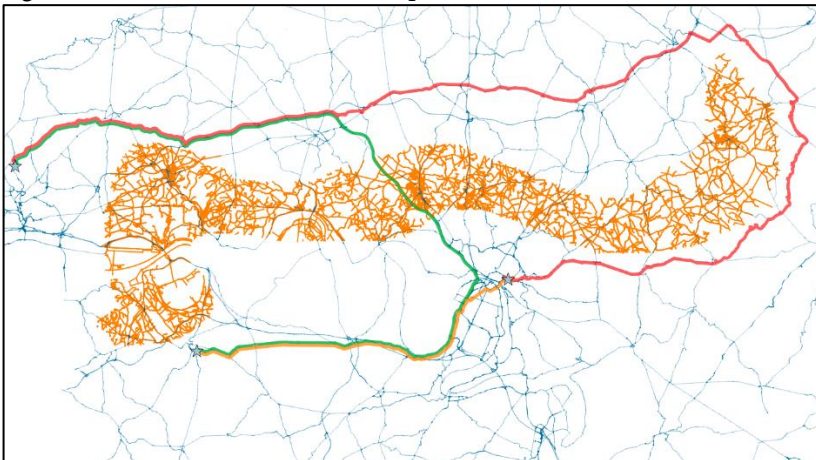
Fonte: o autor.

Figura 5.23. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 0.7$ e $\lambda_1^d = 0.5$.



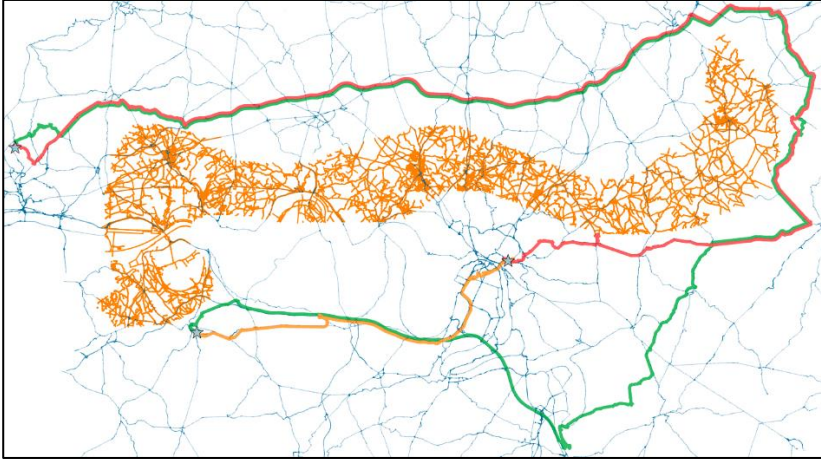
Fonte: o autor.

Figura 5.24. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 0.3$.



Fonte: o autor.

Figura 5.25. Roteiro do veículo 4 com $\lambda_1^u = 0$.



Fonte: o autor.

As dificuldades enfrentadas no desenvolvimento desta simulação se deram na obtenção de dados mais precisos para que se conseguisse resultados mais fidedignos, já que a pesquisa tratou de ambientes dinâmicos onde os eventos não se repetem exatamente da mesma forma e, por isso, são de difícil previsão. Isso acabou sendo resolvido utilizando-se dados obtidos de serviços meteorológicos e imprensa disponíveis em diversas fontes na Internet, no entanto, apesar da França ter a disposição uma moderna estrutura e levar muito a sério as informações meteorológicas, os dados foram obtidos de forma desestruturada e, em função disso, foi necessária uma análise empírica para a construção do cenário apresentado.

No próximo e último Capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas a partir do que foi estudado neste trabalho como um todo, bem como demais insights e considerações finais relacionados aos resultados dos experimentos desenvolvidos. Serão tratados ainda, as sugestões para a continuação desta pesquisa no futuro e possibilidades abertas através desta tese de doutorado.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como ponto chave aplicar um procedimento numérico para obtenção de uma frente de Pareto como metodologia afim de reduzir um problema de caminhos mínimos bi critério a um problema clássico de único critério e, com isso, resolvê-lo através de um método já conhecido e comprovado. Como problema clássico, entende-se encontrar uma rota de menor custo entre uma origem e um destino geograficamente distintos. Através da metodologia proposta neste trabalho, a solução de tal problema transforma-se na busca por caminhos eficientes, do ponto de vista da exposição ao risco assumida, a priori, pelo usuário, considerando os compromissos possíveis entre os critérios. Nesta ocasião, tais critérios foram o índice de risco de ruptura e a distância.

Um experimento foi realizado para verificar se o método proposto é capaz de encontrar resultados satisfatórios e, da mesma forma, avaliar as formulações apresentadas. Através dos resultados obtidos, foi possível demonstrar que a aplicação do algoritmo de Dijkstra, que minimiza Ψ_{st} (4.5), permite encontrar os caminhos Pareto-ótimos para os distintos valores dos parâmetros λ_1 e λ_2 . Sendo Dijkstra um algoritmo reconhecido e popular em aplicações práticas, a metodologia proposta se apresenta como promissora para ser empregada em ambientes e problemas dinâmicos de transporte. Isso demonstra que o objetivo geral deste trabalho foi alcançado e, com isso, obteve-se diversas contribuições relatadas a seguir.

A abordagem proposta aqui fornece uma alternativa de apoio à tomada de decisão através de um novo modelo matemático e teórico útil a diversas áreas dependentes da solução de problemas de transporte em geral, onde não se pretende considerar somente o custo de viagem ou a distância entre os diversos pontos da rede de transporte. Isso ajudará as organizações a melhorar sua agilidade, resiliência e flexibilidade, aumentando assim os níveis de serviço das operações logísticas.

Outro ponto da pesquisa foi o fator dinâmico associado a uma rede de transporte viária onde o teve-se como objetivo apresentar um modelo que permite o desenvolvimento de um ITS capaz de auxiliar usuários do sistema de transporte a movimentar-se durante eventos de crise, bem como assistir tomadores de decisão com o intuito de otimizar recursos. Tendo isto como base para aprimorar o operacional e a coordenação de processos, espera-se reduzir os impactos causados pelo aspecto dinâmico presente na rede de transporte de forma a oferecer melhores decisões e

rotas mais precisas baseadas na colaboração entre usuários e suas preferências, assim como na transmissão da informação. Isso afetará as rotas onde veículos e seus motoristas estarão viajando, bem como todo o planejamento de transporte e operações logísticas.

Este modelo foi pensado para que pudesse atuar sob diversas condições de crise no modal rodoviário, desde acidentes e obras na pista, à desastres naturais e situações emergenciais, de forma que os usuários colaborassem com informações sobre as condições da rede de transporte viária. Ainda, com esta metodologia, os tomadores de decisão estariam habilitados a gerir eficientemente os diversos fluxos que trafegam por esta rede. Outros casos de aplicação seriam para transporte de cargas perigosas, durante a fase de pós-desastre em logística humanitária, logística emergencial e transportes de urgência.

Assim, apresentou-se aqui um modelo de agregação e de arquitetura teórica para lidar com problemas dinâmicos de transporte relacionados ao modal rodoviário, resolvendo-se e demonstrando a aplicação de uma das partes de tal arquitetura: a construção de caminhos mínimos considerando os critérios de custo e risco de ruptura nos arcos.

Assim, as contribuições específicas do método proposto foram:

- Desenvolvimento de um modelo teórico, aos moldes de um sistema inteligente de transporte, que define tanto o fluxo de informações quanto a arquitetura de um Sistema de Transporte Dinâmico (Dynamic Transport Information System – DTIS);
- Desenvolvimento de um método combinado com o algoritmo de Dijkstra para construção de caminhos mínimos, agregando os critérios de custo de viagem e probabilidade de interrupção nos arcos, na forma de um índice de risco;
- Projeto e implementação de um simulador discreto para realizar experimentos que leva em conta o deslocamento dos usuários frente a possíveis crises e rupturas no sistema de transporte, refletindo as proposições do DTIS e a metodologia de cálculo de caminhos;

Optou-se por projetar e implementar o simulador discreto para a realização do experimento hipotético, pois isto permitiu conduzir os experimentos de uma forma mais livre, principalmente em função das questões dinâmicas inerentes a esta pesquisa. Isso facilitou tanto a implementação, quanto a aplicação da metodologia proposta, além do que, este fato também permitiu analisar os resultados e dados de uma maneira personalizada aos propósitos deste trabalho.

As contribuições específicas referentes à aplicação são:

- Testes numéricos para estudar e verificar o impacto da aplicação do modelo de agregação proposto;
- Metodologia para formação da frente de Pareto para análise das soluções;
- O método proposto ajuda a manter os compromissos entre o risco que o usuário deseja evitar o custo de deslocamento;
- Implementação de um simulador discreto para ambientes dinâmicos;
- O simulador desenvolvido, considerando o modelo proposto, pode ser replicado para vários outros casos e experimentos;
- Implementação de algoritmos específicos para resolver problemas de transporte dinâmicos na linguagem de programação Java;
- Desenvolvimento de um modelo teórico de Rede Dinâmica, que pode ser base para a construção de uma infraestrutura assistente ao sistema de transporte.

Apesar de se ter conseguido atingir todos os objetivos desta pesquisa, um dos problemas encontrados, principalmente com relação aos aspectos da simulação, foi conseguir encontrar dados bem estruturados para a construção do cenário hipotético, mais precisamente para representar a função de probabilidade $P = P(x)$ que definia o escalonamento dos eventos de ruptura para entrarem na simulação, bem como o valor do índice de risco ρ_{ij} , isto é, a probabilidade do arco ser interrompido.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Uma questão a ser observada é o fato de que é de responsabilidade do usuário do sistema de transporte determinar o grau de exposição ao risco que ele está disposto a assumir, por meio dos valores de λ_1 e λ_2 . Isto reflete uma limitação do trabalho, pois o usuário pode não saber mensurar ao certo estes valores. Assim, sugere-se como continuação da pesquisa, investigar meios que possibilitem ajudar o usuário a expressar, em valores, seus desejos de caminhos.

Como outras sugestões para trabalhos futuros quanto a modelagem quantitativa, pode-se citar:

- Proposição de um índice adequado para a medida de risco de ruptura dos arcos ρ_{ij} ;

- Aplicar uma metodologia como, por exemplo, a de redes bayesianas para propagação dos riscos de ruptura nos arcos do grafo representativo da malha viária;
- Recalcular a solução de um determinado problema de transporte, como o Problema de Roteirização de Veículos por exemplo, quando surgem rupturas no sistema;
- Inserir a possibilidade do problema lidar com mais critérios, isto é, resolver caminhos mínimos multicritério em ambientes dinâmicos.

Quanto ao modelo DTIS:

- Estudar uma metodologia eficiente que possa ser utilizada em ambientes dinâmicos, principalmente no que diz respeito à matriz de caminhos que deve estar constantemente atualizada;
- Implementar propriamente dita a interface de acesso e interação entre os usuários e o sistema proposto, por meio de dispositivos móveis e Internet;
- Estudar e propor um índice de confiabilidade, bem como um sistema de reputação para validação das interações sociais e barreiras de viagens informadas pelos usuários;
- Conceber uma metodologia que propague a existência de eventos no sistema de transporte com base nos conceitos de redes sociais, credibilidade da informação e reputação;

Sugestões quanto à simulação:

- Implementar a etapa de planejamento da Figura 4.3 no simulador, isto é, inserir a interação dos decisores operacionais das empresas e demais organismos que precisam se deslocar pelo sistema de transporte;
- Incrementar o simulador de forma a executar outros eventos e generalizar a função $P(x)$ para implementar outros modelos de distribuições probabilísticas;
- Inserir no simulador a resolução de outros problemas de transporte, como a solução de problemas de roteirização, fluxo em redes ou localização dinâmicos;
- Possibilidade de rupturas surgirem esporadicamente no sistema, dadas distribuições probabilísticas relacionadas à eventos de ruptura, tanto aqueles raros quanto os mais comuns.

REFERÊNCIAS

ADLER, J.L.; BLUE, V.J. Toward the design of intelligent traveler information systems. **Transp. Res. Part C: emerg technol.** v. 6, n.3. p. 157–172, 1998.

AGENCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES.
Superintendência de Serviços Privados Dados, Móvel e Satélite.
Relatório anual grupo de dados da SPV 2012. Brasília, DF, 2013.

AGENCIA NACIONAL DE TRANPOSTE TERRESTRE. **Anuário Estatístico dos Transportes Terrestres.** Brasília, DF, 2013.

ARNOTT, D. Decision support systems evolution: framework, case study and research agenda. **Eur. J. Inf. Syst.** v.13, p. 247–259, 2004.

ASAKURA, Y.; HATO, E.; SUGINO, K. Simulating Travel Behaviour using Location Positioning Data Collected with A Mobile Phone System. In: KITAMURA, R.; KUWAHARA, M. (Orgs.). **Simulation approaches in transportation analysis: recent advances and challenges.** New York: Springer, p. 183–204, 2005.

BALCIK, B.; BEAMON, B.; SMILOWITZ, K. Last Mile Distribution in Humanitarian Relief. **J. Intell. Transp. Syst.** v.12, n. 2, p. 51–63, 2008.

BEN-AKIVA, M.; PALMA, A. de; ISAM, K. Dynamic network models and driver information systems. **Transp. Res. Part A** v.25, n. 5 p.251–266, 1991.

BLECKEN, A. Supply chain process modelling for humanitarian organizations. **Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.** v.40, n. 8, p. 675–692, 2010.

BOVY, P.H.L., Stern, E. **Route choice: wayfinding in transportation networks.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT). **Relatório Executivo de 2009.** Brasília, DF. 2009.

- CHANDRA, S. Safety-based path finding in urban areas for older drivers and bicyclists. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v. 48, 143–157, 2014.
- CHO, H.-J.; LAN, C. L. Hybrid shortest path algorithm for vehicle navigation. **J. Supercomput.** v. 49, n. 3, p.234–247, 2009.
- CHORUS, C.G et al. Responses to Transit Information among Car-drivers: Regret-based Models and Simulations. **Transp. Plan. Technol.** v. 29, n. 4, p. 249–271, 2006.
- CRAINIC, T.G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.Y. Intelligent freight-transportation systems: Assessment and the contribution of operations research. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.17, n. 6, p. 541–557, 2009.
- DANTZIG, G.B. On the Shortest Route Through a Network. **Manage. Sci.** v.6, n.2, p. 187 – 190, 1960.
- DEFLORIO, F.P. Evaluation of a reactive dynamic route guidance strategy. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.11, n.3, p. 375–388, 2003.
- DROZDEK, A. **Estruturas de Dados e Algoritmos em C++**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- FESTA, P. Shortest Path Algorithms. In: RESENDE, M.C.; PARDALOS, P. (Orgs.). **Handbook of Optimization in Telecommunications**. New York: Springer , p. 185–210. 2006.
- FU, L.; SUN, D.; RILETT, L.R. Heuristic shortest path algorithms for transportation applications: State of the art. **Comput. Oper. Res.** v.33, n. 11, p. 3324–3343, 2006.
- GALLO, G.; PALLOTTINO, S. Shortest path methods: a unifying approach. In: GALLO, G.; SANDI, C. (Eds.). **Netflow at Pisa**. North-Holland. Mathematical Programming Studies, v.26, p. 38–64, 1986.
- GARCÍA-ORTIZ, A.; AMIN, S.; WOOTTON, J. Intelligent transportation systems - nabling technologies. **Math. Comput. Model.** v.22, n. 7, p. 11–81, 1995.

GARRETT, A. Intelligent transport systems - potential benefits and immediate issues. **Road Transp. Res.** v.7, n.2, 61–69, 1998.

GIANNOPOULOS, G. The application of information and communication technologies in transport. **Eur. J. Oper. Res.** v.152, n.2 p. 302–320, 2004.

GIULI, D. et al. Toward a Cooperative Approach for Continuous Innovation of Mobility Information Services. **IEEE Syst. J.** v.7, n.4, p. 669–680, 2013.

GRANAT, J.; GUERRIERO, F. The interactive analysis of the multicriteria shortest path problem by the reference point method. **Eur. J. Oper. Res.** v.151, n. 1, p. 103–118, 2003.

GRESSLER, L.A. **Introdução à pesquisa: projetos e relatórios.** 2.ed. São Paulo: Loyola, 2004.

HAWAS, Y.; NAPENAS, M.J.; HAMDOUCH, Y. Comparative Assessment of Intervehicular Communication Algorithms for Real-Time Traffic Route Guidance. **J. Intell. Transp. Syst.** v.13, n. 4, p. 99–217, 2009.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à pesquisa operacional.** 8. ed. AMGH, Porto Alegre. 2010.

HORN, Michael B.; STACKER, Heather. **Blended: usando a inovação disruptiva para aprimorar a educação.** Porto Alegre: Penso. 2015.

HU, T.; MAHMASSANI, H.S. Day-to-day evolution of network flows under real-time information and reactive signal control. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.5, n. 1, p. 51–69, 1997.

JAGADEESH, G.R.; SRIKANTHAN, T.; QUEK, K.H. Heuristic Techniques for Accelerating Hierarchical Routing on Road Networks. **IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.** v.3, n.4, p. 301–308, 2002.

JARAŠŪNIENE, A. Research into Intelligent Transport Systems (ITS) technologies and efficiency. **Transport.** v.22, n. 2, p. 61–67, 2007.

- JEFFERY, D. Intelligent transport systems for traveller information. **Highways and Tansp.** v. 20, p. 21–23, 1999.
- JENELIUS, E.; MATTSSON, L.G. Road network vulnerability analysis: conceptualization, implementation and application. **Comput. Environ. Urban Syst.** v.49, p. 136–147, 2015.
- KIM, S.; LEWIS, M.E.; WHITE, C.C. Optimal Vehicle Routing With Real-Time Traffic Information. **IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.** v.6, n.2, p. 178–188, 2005.
- KLEIN, B. et al. User-Aware Location Management of Prosumed Micro-services. **Interact. Comput.** v.26, n. 2, p. 118-134, 2013.
- KORTE, B.; VYGEN, J. **Combinatorial optimization: theory and algorithms.** 3.ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 2006.
- LARSEN, A.; MADSEN, O.B.G.; MARIUS M. Solomon. Recent Developments in Dynamic Vehicle Routing Systems. In: GOLDEN, B.; RAGHAVAN, S.; WASIL, E. (Orgs.). **The vehicle routing problem: latest advances and new challenges,** Operations Research/Computer Science Interfaces. Springer, New York, p. 199–218, 2008.
- LECLUYSE, C.; WOENSEL, T.; PEREMANS, H. Vehicle routing with stochastic time-dependent travel times. **4OR** .v.7, p.363–377, 2009.
- LEONELLI, P.; BONVICINI, S.; SPADONI, G. Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology. **J. Hazard. Mater.** v.71, n. 1-3, p. 283–300, 2000.
- LIAO, T.Y.; HU, T.-Y. An object-oriented evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information. **Expert Syst. Appl.** v.38, n.10, p. 12548–12558, 2011.
- LIM, C. P.; JAIN, L. C. Advances in Intelligent Decision Making. In: _____; JAIN, L.C. (Org.). **Handbook on Decision Making.** Berlin: Springer, p. 3–28, 2010.

LIU, B. Route finding by using knowledge about the road network. **IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part A Systems Humans**. v.27, n.4, p. 436–448, 1997.

LUNA, S.V. **Planejamento de pesquisa: uma introdução**. 2.ed. São Paulo: EDUC, 2011.

MARTINS, E.Q.V. On a multicriteria shortest path problem. **Eur. J. Oper. Res.** v.16, n.2, p. 236–245, 1984.

MEI-PING, Y.; JIAN, S.; XIAO-GUANG, Y. Evaluation of Route Guidance System and Its Application. In: KELVIN C. P et al. **Applications of Advanced Technolog in Transportation**. Chicago, Illinois: ASCE, p. 147–152, 2006.

MICHALEWICZ, Z. et al. Case Study: An Intelligent Decision-Support System. **IEEE Intell. Syst.** v.20, n.4, p. 44–49, 2005.

MIETTINEN, K. **Nonlinear Multiobjective Optimization**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

MIKLUŠČÁK, T.; GREGOR, M.; JANOTA, A.,. Using Neural Networks for Route and Destination Prediction in Intelligent Transport Systems. In: MIKULSKI, J. (Org.), **Telematics in the Transport Environment**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, p. 380–387.

NAGURNEY, A.; QIANG, Q. **Fragile networks: identifying vulnerabilities and synergies in an uncertain World**. New Jersey: John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.

NAGURNEY, A.; QIANG, Q. Fragile networks: identifying vulnerabilities and synergies in an uncertain age. **Int. Trans. Oper. Res.** v.19, p. 123–160, 2012.

NETO, C.A. da S.C., PAULA, J.M.P. de, Souza, F.H. de. **Rodovias brasileiras: políticas públicas, investimentos, concessões e tarifas de pedágio**. Rio de Janeiro: IPEA, 2011.

NOGUEIRA, C.W. **O enfoque da logística humanitária na localização de uma central de inteligência e suporte para situações emergenciais e no desenvolvimento de uma rede dinâmica**. 2010. 273

f. Tese (Programa de Pós Graduação Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: UFSC, 2010.

NOVAES, A.G.N. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**: estratégia, operação e avaliação. 3.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

_____; FRAZZON, E.M., BURIN, P.J. Dynamic Vehicle Routing in Overcongested Urban Areas. In: KREOWSKI, H. J., SCHOLZ-REITER, B., THOBEN, K.D. (Orgs.), **Dynamics in logistics**: second international conference, LDIC 2009, Bremen, Germany, Aug. 2009 Proceedings. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 49–58, 2009.

_____; BEZ, E.T.; BURIN, P.J. Fault detection in dynamic vehicle routing operations. In: KREOWSKI, H.J.; SCHOLZ-REITER, B.; THOBEN, K.D. (Org.). **Dynamics in logistics**: third international conference, LDIC 2012 Bremen, Germany, February/ March 2012 Proceedings. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 13–32, 2013.

PAHLAVANI, P.; DELAVAR, M.R. Multi-criteria route planning based on a driver's preferences in multi-criteria route selection. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.40, p. 14–35, 2014.

PAMUŁA, T. Traffic flow analysis based on the real data using neural networks. In: MIKULSKI, J. (Org.). **Telematics in the transport environment**. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 364–371, 2012.

PAPINSKI, D.; SCOTT, D.M. A GIS-based toolkit for route choice analysis. **J. Transp. Geogr.** v.19, n.3, p. 434–442, 2011.

SHEU, J.B. A sequential group decision-making approach to strategic planning for the development of commercial vehicle operations systems. **Transp. Res. Part A Policy Pract.** v.36, n. 4, p. 335–350, 2002.

SHIM, J.P. et al. Past, present, and future of decision support technology. **Decis. Support Syst.** v.33, n.2, p.111–126, 2002.

SLINN, M.; MATTHEWS, P.; GUEST, P. Intelligent transport systems. In: **Traffic engineering design**: principles and practice. 2.ed. Elsevier, p. 209–217, 2005.

- SOROUGH, H.M. Optimal paths in bi-attribute networks with fractional cost functions. **Eur. J. Oper. Res.** v.190, n. 3, p. 633–658, 2008.
- SUMİLA, M. Selected aspects of message transmission management in ITS Systems. In: MIKULSKI, J. (Org.), **Telematics in the transport environment, communications in computer and information science**. Berlin: Springer, 2012. p. 141–147.
- SZUCS, G. Developing co-operative transport system and route planning. **Transport** v. 24, n.1 p. 21–25, jan.2009.
- TANDLER, S.; ESSIG, M. Conceptual Framework of Supply Chain Safety. In: **Supply Chain Safety Management: security and robustness in logistics**. Berlin, Heidelberg: Springer, p. 3–40, 2013.
- TANIGUCHI, E.; FERREIRA, F.; NICHOLSON, A. A Conceptual Road Network Emergency Model to Aid Emergency Preparedness and Response Decision-Making in the Context of Humanitarian Logistics. **Procedia - Soc. Behav. Sci.** v. 39, p. 307–320, 2012.
- _____; SHIMAMOTO, H. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.12, n.4, p. 235–250, 2004.
- TANIMOTO, J.; SAGARA, H. Social Diffusive Impact Analysis Based on Evolutionary Computations for a Novel Car Navigation System Sharing Individual Information in Urban Traffic Systems. **J. Navig.** v.64, n.4, p. 711–725, 2011.
- THAKURIAH, P. V. SEN, A. Quality of information given by advanced traveler information systems. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.4, n.5, p. 249–266, 1996.
- TOMASINI, R.; VAN WASSENHOVE, L. **Humanitarian logistics**. Macmillan, Grã-Bretanha: Palgrave, 2009.
- TOUMAZIS, I.; KWON, C. Routing hazardous materials on time-dependent networks using conditional value-at-risk. **Transp. Res. Part C Emerg. Technol.** v.37, p. 73–92, 2013.

- TSEKERIS, T. et al. Intelligent transport systems and regional digital convergence in Greece. **J. Transp. Lit.** v.7, n. 2, p. 297–318, 2012.
- TSUGAWA, S., KATO, S. Energy ITS: another application of vehicular communications. **IEEE Commun. Mag.** V. 48, n. 11, p. 120–126, 2010.
- TUNG TUNG, C.; LIN CHEW, K. A multicriteria Pareto-optimal path algorithm. **Eur. J. Oper. Res.** v.62, n.2, p. 203–209, 1992.
- UCHIDA, T.; IIDA, Y.; NAKAHARA, M. Panel survey on drivers' route choice behavior under travel time information. **Inf. Syst. Conf.**, 1994.
- WAHLE, J. et al. A dynamic route guidance system based on real traffic data. **Eur. J. Oper. Res.** v.131, n.2, p. 302–308, 2001.
- WATLING, D.; VAN VUREN, T. **The modelling of dynamic route guidance systems.** *Transp. Res.* v.1, n.2, p. 159–182, 1993.
- YANG, L.; WANG, F. Driving into intelligent spaces with pervasive communications. **IEEE Intell. Syst.** v.22, n. 1, p. 12–15, 2007.
- ZAK, J. Decision support systems in transportation. In: JAIN, L.C.; LIM, C.P. (Orgs.). **Handbook on decision making, intelligent systems reference library.** Berlin, Heidelberg: Springer, p. 249–294, 2010.
- ZEIMPEKIS, V.; GIAGLIS, G.M.,. A Dynamic Real-Time Vehicle Routing System for Distribution Operations to Urban Freight Movement. In: DOUKIDIS, G.J.; VRECHOPOULOS, A.P. (Orgs.). **Consumer driven electronic transformation: applying new technologies to enthuse consumers and transform the supply chain.** Berlin Heidelberg: Springer, p. 23–37, 2005.
- ZHANG, G.; LI, M.; WANG, J. Application of the advanced public transport system in cities of china and the prospect of its future development. **J. Transp. Syst. Eng. Inf. Technol.** v. 7, n. 5, p. 24–30, 2007.

APÊNDICE A – Pontos de Demanda Utilizados na Simulação

Tabela 1 – Relação dos pontos de demanda georreferenciados utilizados no cenário hipotético apresentado no Capítulo 5.

Número do Ponto de Demanda	X	Y
1	1.1723491	49.3698782
2	0.1772977	49.5792956
3	0.525995	49.34889
4	1.032566	49.1950711
5	0.5492593	49.6385513
6	1.0485271	49.4743788
7	0.2211863	49.538676
8	1.0350475	49.6835554
9	1.5284444	49.8251303
10	1.5156517	49.3183833
11	1.1220664	49.4384198
12	0.8154013	49.3638063
13	1.6248867	49.7037464
14	1.372018	49.0076992
15	0.8391601	49.225578

Fonte: elaborado pelo autor.