



MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO AO PROBLEMA  
DE LOCALIZAÇÃO DE REBOQUES PARA ATENDIMENTO A INCIDENTES  
EM VIAS EXPRESSAS

Marina Leite de Barros Baltar

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Glaydston Mattos Ribeiro  
Laura Silvia Bahiense da Silva  
Leite

Rio de Janeiro  
Junho de 2022

MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO AO PROBLEMA  
DE LOCALIZAÇÃO DE REBOQUES PARA ATENDIMENTO A INCIDENTES  
EM VIAS EXPRESSAS

Marina Leite de Barros Baltar

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientadores: Glaydston Mattos Ribeiro  
Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Aprovada por: Prof. Glaydston Mattos Ribeiro  
Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite  
Prof. Leise Kelli de Oliveira  
Prof. Antonio Augusto Chaves  
Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto  
Prof. Matheus Henrique de Sousa Oliveira

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JUNHO DE 2022

Baltar, Marina Leite de Barros

Modelo de otimização multiobjetivo aplicado ao problema de localização de reboques para atendimento a incidentes em vias expressas/Marina Leite de Barros Baltar. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XII, 93 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Glaydston Mattos Ribeiro

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 79 – 93.

1. Incidentes. 2. Modelo de localização. 3. Vias expressas. I. Ribeiro, Glaydston Mattos *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*A todos àqueles que seguem em  
busca da ciência.*

# Agradecimentos

Gostaria de inicialmente agradecer aos meus orientadores, o Prof. Glaydston Mattos Ribeiro e a Profa. Laura Bahiense, que foram os grandes responsáveis por minha evolução como pesquisadora e professora. Agradeço, em memória, ao Prof. Paulo Cezar, que foi quem me trouxe para o caminho da Engenharia de Tráfego. Agradeço a banca examinadora por sua disponibilidade e pelos ensinamentos e contribuições trazidas. Agradeço ao Joaquim Dinis e ao Rafael Santos, representando a CET-Rio como um todo, por todos os aprendizados sobre operação de tráfego, atendimento a incidentes e pela disponibilização dos dados para eu seguir com a minha pesquisa. Agradeço aos professores da Universidade Federal de Mato Grosso que sempre me apoiaram na continuidade do doutorado, por muito tempo a distância e exigindo certos ajustes no horário em sala de aula para eu conseguir continuar desenvolvendo minha pesquisa. Agradeço aos meus familiares e amigos, que me apoiaram e entenderam minha ausência para continuar o doutorado trabalhando e as crises de ansiedade em meio a tudo isso.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO APLICADO AO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE REBOQUES PARA ATENDIMENTO A INCIDENTES EM VIAS EXPRESSAS

Marina Leite de Barros Baltar

Junho/2022

Orientadores: Glaydston Mattos Ribeiro  
Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Programa: Engenharia de Transportes

O congestionamento de tráfego viário tem sido um dos principais problemas enfrentados nas últimas décadas. Isso pode ser intensificado por meio de incidentes de tráfego que geram interrupções viárias irregulares, e, conseqüentemente, congestionamentos não-recorrentes, que aumentam as emissões de poluentes veiculares, principalmente o dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Neste contexto, os reboques são componentes chaves para integrar a detecção, resposta e remoção de incidentes. Assim, esta tese busca explorar a realocação de reboques de atendimento a incidentes em vias expressas com os objetivos de maximizar a quantidade de incidentes atendidos, minimizar as emissões de  $CO_2$  e minimizar o custo total da operação tendo como restrições um tempo médio para atendimento e um orçamento máximo disponível para a operação de reboques, o que inclui aluguel dos equipamentos e salário dos motoristas. O modelo foi aplicado a dados reais de incidentes da Avenida Brasil e Linha Vermelha, principais vias expressas da cidade do Rio de Janeiro, disponibilizados pela Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade do Rio de Janeiro (CET-Rio). Para fins de análise, foram considerados 10.938 incidentes ocorridos na área de estudo no ano de 2018. Os resultados obtidos indicam que o modelo é capaz de fornecer boas soluções para o problema e que, quanto melhor o nível de serviço esperado no atendimento a incidentes, maior a influência da quantidade de reboques disponíveis e, conseqüentemente, do custo da operação.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## A MULTI-OBJECTIVE APPROACH TO THE LOCATION PROBLEM OF TOW TRUCKS TO SERVE VEHICLE INCIDENTS IN EXPRESSWAYS

Marina Leite de Barros Baltar

June/2022

Advisors: Glaydston Mattos Ribeiro

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Department: Transportation Engineering

Road traffic congestion has been one of the main urban problems faced in recent decades. This is intensified through traffic incidents that generate irregular road interruptions and, consequently, non-recurrent congestion which increases vehicular pollutants, mainly carbon dioxide ( $CO_2$ ). In this context, tow trucks are key components for integrating incident detection, response and removal. Thus, this PhD dissertation seeks to explore tow trucks reallocation that response expressway incidents with the objective of maximizing the number of incidents serviced, minimizing the  $CO_2$  emission and minimizing the total cost of the operation. As constraints, we consider a maximum average time to response and a maximum available value of budget for the tow truck operation, which includes tow trucks rental and drivers wages. Avenida Brasil and Linha Vermelha, the main expressways in the city of Rio de Janeiro, were used as case study and their data were made available by the Traffic Engineering Company of the City of Rio de Janeiro (CET-Rio). For analysis purposes, 10,938 incidents occurred in the study area at 2018 were considered. The results show that our approach can provide effective solutions for the problem and that if the maximum time to response is restricted, the number of tow trucks has more influence on the operation, consequently, its cost is increased.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos e contribuições . . . . .	4
1.2 Organização da tese . . . . .	6
<b>2 Definições e conceitos</b>	<b>7</b>
2.1 Problemas de localização de facilidades . . . . .	7
2.2 Otimização e teoria de filas . . . . .	9
2.3 Modelos de otimização multiobjetivos . . . . .	11
2.4 Métodos clássicos de solução dos problemas multiobjetivos . . . . .	13
<b>3 Revisão bibliográfica sobre incidentes de tráfego</b>	<b>16</b>
3.1 Incidentes de tráfego . . . . .	16
3.2 Impactos gerados pelos incidentes de tráfego . . . . .	18
3.3 Ações a serem empregadas para reduzir o impacto dos incidentes . . . . .	24
3.4 Modelos de localização envolvendo o gerenciamento de incidentes . . . . .	26
<b>4 Modelagem Matemática</b>	<b>30</b>
4.1 Considerações do problema . . . . .	30
4.1.1 Cálculo da quantidade de veículos impactados por incidentes . . . . .	31
4.1.2 Cálculo das emissões de dióxido de carbono . . . . .	32
4.2 Modelo de localização proposto . . . . .	34
4.2.1 Parâmetros e variáveis envolvidas no modelo . . . . .	37
4.2.2 Funções Objetivo . . . . .	39
4.2.3 Restrições do modelo proposto . . . . .	41
<b>5 Estudo de caso</b>	<b>45</b>
5.1 Parâmetros do modelo . . . . .	53
5.2 Cenários estudados . . . . .	56

5.3	Resultados e Discussões . . . . .	58
5.3.1	Cenário 1 . . . . .	59
5.3.2	Cenário 2 . . . . .	61
5.3.3	Cenário 3 . . . . .	62
5.3.4	Cenário 4 . . . . .	64
5.3.5	Cenário 5 . . . . .	64
5.3.6	Cenário 6 . . . . .	66
5.3.7	Cenário 7 . . . . .	67
5.3.8	Cenário 8 . . . . .	68
5.3.9	Análise Comparativa . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Conclusões e Recomendações</b>	<b>76</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>79</b>

# Lista de Figuras

2.1	Sistema de filas. . . . .	10
2.2	Processo de nascimento e morte. . . . .	10
2.3	Ótimo local no sentido de Pareto. . . . .	12
2.4	Conjuntos ótimos de Pareto. . . . .	13
4.1	Atraso gerado pela ocorrência de um incidente (BARDAL e JOR- GENSEN [1]). . . . .	31
4.2	Esquema demonstrando o atendimento realizado por um reboque leve <i>l</i> a incidentes envolvendo veículos de passeio na seção <i>c</i> . . . . .	36
5.1	Mapa da cidade do Rio de Janeiro. . . . .	45
5.2	Mapa da cidade do Rio de Janeiro com as densidades demográficas. . . . .	46
5.3	Mapa da cidade do Rio de Janeiro com os Índices de Desenvolvimento Social. . . . .	47
5.4	Tipos de reboques. . . . .	48
5.5	Mapa com as vias estudadas: Avenida Brasil e Linha Vermelha. . . . .	48
5.6	Mapa de calor com os incidentes atendidos por reboques em 2018. . . . .	49
5.7	Tipos de incidentes atendidos em 2018. . . . .	50
5.8	Quantidade de incidentes atendidos em 2018 por período do dia. . . . .	52
5.9	Exemplos dos histogramas de frequência e de atendimento dos inci- dentes. . . . .	53
5.10	Etapas seguidas para realização do estudo de caso. . . . .	54
5.11	Emissão de carbono por tipo de veículo. . . . .	55
5.12	Resultados obtidos no Cenário 1. . . . .	60
5.13	Resultados obtidos no Cenário 1 com o custo de R\$ 118.603,00. . . . .	61
5.14	Resultados obtidos no Cenário 2. . . . .	61
5.15	Resultados obtidos no Cenário 3 (Pareto Ótimo). . . . .	62
5.16	Resultados obtidos no Cenário 3 com diferentes valores de orçamento. . . . .	63
5.17	Resultados obtidos no Cenário 4 (Pareto Ótimo). . . . .	65
5.18	Resultados obtidos no Cenário 5 (Pareto Ótimo). . . . .	65
5.19	Resultados obtidos no Cenário 5 com o custo de R\$ 234.991,00. . . . .	66

5.20	Resultados obtidos no Cenário 6 (Pareto Ótimo). . . . .	67
5.21	Resultados obtidos no Cenário 7. . . . .	68
5.22	Resultados obtidos no Cenário 8. . . . .	69
5.23	Comparação entre os resultados obtidos com as diferentes Funções Objetivo (4.8) e (4.9). . . . .	72
5.24	Comparação entre os resultados obtidos nos Cenários 1 e 2 conside- rando quantidade de atendimentos e custo. . . . .	73
5.25	Comparação entre os resultados obtidos nos Cenários 1 e 2 conside- rando emissão e custo. . . . .	73
5.26	Resultado obtido para reboques leves pela manhã no Cenário 3 com o custo de R\$ 118.603,00. . . . .	74
5.27	Resultado obtido para reboques leves pela manhã no Cenário 6 com o custo de R\$ 144.905,00. . . . .	74

# Lista de Tabelas

3.1	Proporção da capacidade da via expressa liberada no momento do incidente . . . . .	17
4.1	Conjuntos presentes no modelo matemático proposto. . . . .	35
4.2	Parâmetros de entrada do modelo matemático proposto. . . . .	38
4.3	Variáveis de decisão do modelo matemático proposto. . . . .	39
5.1	Análise temporal dos incidentes. . . . .	51
5.2	Valores das constantes usadas na Equação 4.3. . . . .	55
5.3	Dados sobre aluguel e salários dos condutores . . . . .	56
5.4	Tempo médio (minutos) para atendimento nos cenários estudados . .	56
5.5	Valores utilizados . . . . .	57
5.6	Resultados dos processos de otimização do $\varepsilon$ - constraint . . . . .	59
5.7	Comparação entre os resultados obtidos . . . . .	71

# Capítulo 1

## Introdução

O congestionamento de tráfego rodoviário, principalmente das vias expressas, é um sério problema enfrentado diariamente nas cidades (JING *et al.* [2], BAI *et al.* [3]) que resulta em importantes perdas econômicas e de produtividade, além de um crescente impacto ambiental (BAUZA *et al.* [4]), consumo excessivo de combustível fóssil (GROTE *et al.* [5]), atraso no tempo de viagem (PALMA e LINDSEY [6]) e perda da qualidade de vida da população urbana.

Reconhecer os gargalos recorrentes podem ajudar os engenheiros de tráfego a desenvolver estratégias para aliviar as filas de congestionamento associadas (JING *et al.* [2]), porém existem os congestionamentos definidos como não-recorrentes que causam atrasos inesperados e podem ocorrer a qualquer hora do dia, com localizações e durações que geralmente dependem das condições locais da rede viária, da demanda de viagens e da capacidade (ANBAROGLU *et al.* [7]).

A principal causa dos congestionamentos não recorrentes são os incidentes de tráfego (ANBAROGLU *et al.* [7]), tais como enguiço mecânico, sinistros e pneu furado. Eles aumentam os tempos de viagem e reduzem a confiabilidade dos mesmos, sendo esse uma das medidas chave de desempenho da via (HOJATI *et al.* [8]). Ter confiança no tempo de viagem é importante tanto para os planejadores de transportes quanto para os tomadores de decisão (XIAO *et al.* [9]) e, se antes era possível melhorar o tempo de viagem com novos projetos, essas opções se tornaram limitadas em cidades com redes de transportes já consolidadas.

Além disso, os incidentes contribuem para o aumento da emissão de poluentes veicular, principalmente o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), em consequência do fluxo de tráfego intermitente, gerado pela condição imposta pelo gargalo na via (BARTH e BORIBOONSOMSIN [10], CHUNG *et al.* [11], ZHANG *et al.* [12], SOOKUN *et al.* [13]).

A adoção de medidas que visam a desobstrução de vias rapidamente é essencial para reduzir a deseconomia gerada pelos incidentes, visto que as perdas e a influência de um incidente são proporcionais a sua duração (YUAN e CHEU [14]). Sendo

assim, é importante identificar e quantificar os fatores que influenciam o tempo para limpeza dos incidentes para beneficiar a gestão e, conseqüentemente, mitigar o impacto do congestionamento não recorrente (MA *et al.* [15]). Além disso, no caso de vias expressas, os efeitos dos incidentes geralmente são mais graves, pois essas vias são caracterizadas por um grande fluxo de veículos que trafegam em alta velocidade, resultando em sinistros com ferimentos graves ou até mesmo fatalidades (JEONG *et al.* [16]).

Especificamente em relação às emissões veiculares, grande parte da energia consumida atualmente no setor de transporte é proveniente de combustíveis fósseis não renováveis que intensificam o aquecimento global e, conseqüentemente, as mudanças climáticas (IPCC [17]). Globalmente, o setor de transporte é responsável por 23% do total de energia relacionada às emissões de gases do efeito estufa (GEE) e 13% das emissões globais de GEE (UN-HABITAT [18]), sendo o transporte rodoviário responsável pela maior parte dessas emissões (OECD [19]). Sem a implementação de políticas agressivas de mitigação de GEE, as emissões dos transportes podem aumentar a um ritmo mais rápido do que as de qualquer outro setor (IPCC [17]).

Outro ponto a ser observado é que as áreas urbanas produzem uma quantidade desproporcional em relação ao seu tamanho geográfico, portanto as autoridades locais e os tomadores de decisão de transporte precisam se esforçar para mitigar essas emissões (GROTE *et al.* [5]).

Diante do exposto, políticas de gerenciamento de tráfego, estando o gerenciamento de incidentes dentre elas, são essenciais principalmente do ponto de vista da sustentabilidade, pois elas buscam reduzir os impactos negativos do tráfego explorando a infraestrutura existente (GUERRIERI e MAURO [20]), além de reduzir os tempos de viagem e minimizar as emissões de poluentes (CHEN e YU [21]), evitando gastos desnecessários e quase sempre inviáveis devido às restrições orçamentárias dos órgãos de gestão e controle.

Como citado por GEROLIMINIS *et al.* [22] e OZBAY *et al.* [23], o problema de gerenciamento de incidentes pode ser classificado como um problema de alocação de recursos de rede estocástico, uma vez que os incidentes ocorrem aleatoriamente em uma rede, e é necessário localizar os equipamentos empregados na operação do atendimento. Nesse sentido, considera-se importante determinar corretamente a localização dos veículos de atendimento, tanto estratégica quanto operacionalmente, de forma a garantir uma cobertura adequada e um tempo de resposta satisfatório, levando em consideração todas as incertezas envolvidas no processo.

Neste contexto, os reboques são componentes chaves para integrar a detecção, resposta e remoção de incidentes (LOU *et al.* [24]), visto que eles retiram os veículos da via, auxiliam os agentes no local e protegem os motoristas dos veículos avariados. No Brasil, tradicionalmente, a operação de reboques é provida pelas autoridades pú-

blicas, a partir de um contrato com empresas privadas, e uma alocação adequada da frota de reboques é essencial para uma operação com bons resultados na redução do congestionamento, do consumo de combustível, da emissão veicular e de incidentes secundários.

Sendo assim, esta tese propõe um modelo matemático para localização de reboques de atendimento a incidentes em vias expressas com objetivo de reduzir os impactos negativos por ele causado, como aumento na emissão de  $CO_2$ . O presente estudo contribui com a literatura ao trazer um modelo matemático de localização multiobjetivo que considera a Teoria de Filas e questões de sustentabilidade. Além disso, os resultados desse modelo permitem auxiliar os agentes públicos na melhor utilização dos recursos disponíveis e na melhoria da qualidade de vida da população. Destaca-se que o  $CO_2$  foi escolhido por ser o principal contribuinte das emissões de GEE (GROTE *et al.* [5], JABALI *et al.* [25], DECC [26]). Sua relevância é corroborada pelo Protocolo de Quioto e pelo Acordo de Paris que estabelecem metas de mitigação para as emissões desse poluente atmosférico.

Dessa forma, a atual pesquisa visa explorar o *trade-off* existente entre a maximização do atendimento a incidentes de tráfego, a minimização de emissões de  $CO_2$  e a minimização do custo da operação. Para tal, um modelo matemático multiobjetivo é proposto, baseado no problema de localização de facilidades, para localizar reboques visando o atendimento a incidentes, tendo como restrições um tempo médio de resposta e um orçamento máximo disponível para a operação, o que inclui aluguel dos equipamentos e salário dos motoristas.

Os objetivos citados possuem um *trade-off* entre si, já que a melhoria de um pode resultar na piora de outro. Na verdade, quando se trabalha com problemas multiobjetivos, dificilmente existe uma única solução capaz de obter um resultado que seja ótimo para todas as funções objetivo simultaneamente. Para esses problemas comumente aplica-se o conceito de dominância de Pareto a fim de encontrar o conjunto de soluções eficientes para o problema, ou seja, seu Pareto ótimo.

Dados reais de incidentes da Avenida Brasil e Linha Vermelha, principais vias expressas da cidade do Rio de Janeiro, foram disponibilizados pela Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade do Rio de Janeiro (CET-Rio) para testes do modelo matemático proposto. Assim, foram considerados 10.938 incidentes ocorridos na área de estudo no ano de 2018.

Cabe ressaltar que essa pesquisa está alinhada à Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU [27]). A Agenda cobre 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo que este estudo está diretamente relacionado aos listados a seguir:

- Objetivo 3 (assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades), devido à minimização do impacto social causado pelo

incidente como o aumento no tempo de viagem, stress, inalação de poluentes etc.;

- Objetivo 11 (tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis), devido ao atendimento mais rápido aos incidentes, que reduz os acidentes secundários, aumentando assim a segurança viária;
- Objetivo 12 (assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis), devido a redução dos congestionamentos que impacta no consumo de combustível; e
- Objetivo 13 (tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos), devido à redução das emissões de  $CO_2$ , principal contribuinte para o aumento das emissões de GEE.

As ferramentas de pesquisa operacional são importantes na tomada de decisão com visões sustentáveis, porém, para isso, é necessário romper o pensamento clássico de que essas ferramentas deveriam fundamentalmente responder aos problemas de logística e otimização concentrando-se apenas no aspecto econômico, principalmente por meio de modelos matemáticos que envolvam o custo, não sendo satisfatórios aos outros dois pilares da sustentabilidade (ambiental e social) (KUNSCH *et al.* [28], BRANS e KUNSCH [29], WHITE e LEE [30]). Quando os tomadores de decisão não respeitam o tripé do desenvolvimento sustentável, observa-se historicamente a exploração de recursos naturais e outras deteriorações ambientais que acarretam redução da qualidade do ar e de vida (KELLY [31]). Recentemente, a incorporação de objetivos ambientais e sociais baseados no custo da energia, uso do solo e custo de construção, congestionamento, ruído, qualidade de vida, poluição, crise de combustíveis fósseis e turismo estão se tornando habituais (FARAHANI *et al.* [32]).

Além disso, sabe-se que estratégias integradas para reduzir GEE e emissões de poluentes atmosféricos resultam em co-benefícios significativos (KING *et al.* [33], TIWARY *et al.* [34]), como melhorar a qualidade do ar e reduzir gastos com saúde pública. Portanto, o efeito geral de uma intervenção de transporte (ou efeito combinado de muitas intervenções pequenas e difusas) nas emissões de  $CO_2$  é mais importante do que quaisquer efeitos localizados (GROTE *et al.* [5]).

## 1.1 Objetivos e contribuições

Essa Tese de Doutorado tem como objetivo principal propor um modelo matemático multiobjetivo que visa maximizar o atendimento a incidentes de tráfego, minimizando, simultaneamente, as emissões de  $CO_2$  e o custo da operação. Além

disso, essa abordagem incorpora restrições reais observadas na prática diária dos atendimentos a incidentes realizados em uma cidade de grande porte.

Como objetivos específicos, tem-se:

1. Analisar a ocorrência de incidentes em uma cidade de grande porte;
2. Avaliar o impacto causado pelos incidentes na emissão de  $CO_2$  em vias expressas;
3. Agregar conceitos da Teoria de Filas no modelo matemático; e
4. Avaliar os resultados da modelagem matemática em um estudo real que compreende a cidade do Rio de Janeiro.

Para o primeiro objetivo específico, uma análise exploratória é empregada, a partir de dados reais, para identificar os incidentes que mais impactam o tráfego rodoviário, bem como suas causas.

Para atingir o segundo objetivo específico, utilizou-se o Método MEET (*Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport*). Este método foi utilizado, pois, de acordo com BAI *et al.* [3]: é baseado em medições na via, portanto os parâmetros são de experiências reais; é sensível à velocidade, que é uma referência importante e de fácil obtenção; possui uma ampla cobertura de possíveis combinações de tecnologias e combustíveis; e considera muitos fatores, como tipos de combustível, motores e tipos de veículos.

Devido ao tempo necessário para o atendimento de um incidente e seu reflexo no congestionamento, o terceiro objetivo específico busca incorporar conceitos de Teoria de Filas no processo de localização definindo um nível de serviço esperado.

O último objetivo específico consiste na utilização do modelo multiobjetivo na cidade do Rio de Janeiro. Essa aplicação permite analisar o *trade-off* existente entre os objetivos. Isso é importante para os tomadores de decisão que buscam oferecer um serviço de remoção eficiente e sustentável. Para a resolução do modelo foi utilizado o método  $\varepsilon$ -Constraint, no qual o problema é convertido em mono-objetivo a partir de uma função objetivo considerada principal, com os demais objetivos transformados em restrições. Dessa forma, o novo modelo é resolvido de forma iterativa, obtendo assim as Soluções ótimas de Pareto. Esse método de solução é capaz de resolver problemas multiobjetivos difíceis com a eficiência dos métodos voltados para problemas de objetivo único (BECERRA e COELLO [35]), além disso, ele possui diversas vantagens sobre o Método da Soma Ponderada, outra abordagem clássica para solução de modelos multiobjetivos, como ser capaz de produzir soluções eficientes não-extremas (MAVROTAS [36]).

## 1.2 Organização da tese

Esse documento está organizado em cinco capítulos, além deste capítulo introdutório. O Capítulo 2 apresenta definições e conceitos utilizados para o desenvolvimento do modelo matemático proposto. O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica que aborda o gerenciamento de incidentes de tráfego, o impacto ambiental gerado pelos mesmos e os modelos de localização destacando aqueles voltados para localização de veículos de atendimento, bem como as lacunas preenchidas por esta pesquisa.

O Capítulo 4 descreve o modelo matemático proposto para o problema de localização de reboques que realizam atendimentos a incidentes em vias expressas. Já o Capítulo 5 apresenta o estudo de caso, com os dados reais disponibilizados pela CET-Rio, e discute os resultados. O último capítulo, Capítulo 6, exhibe as considerações finais do trabalho e as propostas de estudos futuros.

# Capítulo 2

## Definições e conceitos

Os analistas procuram representar as principais características de um objeto real através de modelos matemáticos, mas, em geral, simplificações razoáveis devem ser feitas e, para validá-lo, é necessário que sua solução seja coerente com o contexto original (ARENALLES *et al.* [37]). Quando se trata de pesquisa operacional, mais particularmente de programação matemática, se fala em problemas de decisão, isto é, a solução do problema apoia o processo de tomada de decisões, porém é importante salientar que esses modelos não substituem os tomadores de decisão (ARENALLES *et al.* [37]).

Segundo LOBATO [38], otimização é melhorar algo que existe ou projetar algo novo com mais eficiência e menor custo sem ter que testar todas as possibilidades. Mais especificamente, os modelos de otimização linear são amplamente utilizados para representar diversas situações práticas. Algumas aplicações desses modelos são: problemas de mistura, problemas de transporte, transbordo e designação e problemas de planejamento de produção (ARENALLES *et al.* [37]).

No presente capítulo são apresentados conceitos e definições utilizados no desenvolvimento desta pesquisa que envolvem: problemas de localização de facilidades, otimização e teoria de filas, e modelos de otimização multiobjetivos.

### 2.1 Problemas de localização de facilidades

Existem muitos problemas de tomada de decisão cujas informações são espaciais (geográficas), eles são chamados de decisões de localização (FARAHANI *et al.* [32]). Esses problemas podem ser: contínuos, nos quais as facilidades podem ser alocadas em qualquer ponto do espaço e a demanda é representada por uma distribuição de probabilidade espacial; em rede, nos quais as facilidades e demandas podem ser alocados ou ocorrem apenas nos nós e arcos de uma rede; ou discretos, nos quais as facilidades e demandas estão localizadas nos nós.

Os problemas de localização de facilidades possuem várias aplicações como a

localização de centros de comunicação em redes telefônicas, de subestações em redes de energia elétrica e de localização de correspondências, rede logística, hospitais, mercados, entre outros. O planejamento estratégico tanto de empresas privadas e públicas tem como aspecto crítico a localização de facilidades (ARENALES *et al.* [37]), visto que pode-se levar ao desperdício de recursos econômicos e insatisfação do cliente ao tomar a decisão errada. Esses problemas tratam de decisões sobre onde devem ser localizadas facilidades considerando os clientes que podem ser servidos de forma a otimizar um certo critério, como minimizar o custo ou qualquer tipo de perda ou maximizar o benefício, como o lucro.

Eles estão inseridos nos problemas de otimização discreta, também conhecido como programação inteira combinatória. Nesses casos algumas variáveis pertencem a um conjunto discreto, frequentemente, algum subconjunto de números inteiros (ARENALES *et al.* [37]).

Alguns modelos matemáticos importantes de localização são (ARENALES *et al.* [37]):

- *P*-mediana: envolve a localização de *p* facilidades e a designação de clientes a facilidades de modo a minimizar a soma das distâncias de clientes a facilidades;
- *P*-centros: envolve a localização de *p* facilidades e a designação de clientes a facilidades de modo a minimizar a maior distância de clientes a facilidades;
- Localização de facilidades: envolve a localização de facilidades e a designação de clientes a facilidades com o objetivo de minimizar o custo fixo de implantação de facilidades e o custo variável de atendimento das demandas dos clientes; e
- Localização de facilidades e fonte única: problema similar ao anterior, mas neste caso o cliente é atendido a partir de uma única instalação.

Os problemas de localização podem ter capacidade ilimitada ou limitada, neste último caso se associa uma capacidade  $Q$  à facilidade.

Atualmente, a combinação desses problemas clássicas com outros aspectos de gestão industrial e operacional, como cadeia de suprimentos, teoria das filas e gestão de preços, receberam considerável atenção. Por exemplo, para otimizar decisões e diminuir o tempo de espera dos clientes nas filas, fabricantes e prestadores de serviços utilizam a alocação de recursos afim de melhorar o desempenho dos sistemas de filas (HAJIPOUR e PASANDIDEH [39]). Conceitos sobre teoria de filas, importantes para este trabalho, serão apresentados com mais detalhes na Seção 2.2.

Além disso, existe um forte interesse interdisciplinar nesse tipo de problema. Matemáticos, pesquisadores interessados em pesquisa operacional, arquitetos, cientistas da computação, economistas, engenheiros de várias disciplinas, entre outros,

descobriram como interesse comum a preocupação com layouts e localização das instalações. Cada um traz diferentes interpretações e diferentes soluções para o problema (PASANDIDEH e NIAKI [40]).

Observa-se recentemente também que os objetivos ambientais e sociais com base no custo da energia, uso do solo e custo de construção, congestionamento, ruído, qualidade de vida, poluição, crise de combustíveis fósseis e turismo, estão se tornando comuns. Conseqüentemente, uma das dificuldades mais importantes para enfrentar esses problemas consiste em encontrar uma maneira de medir esses critérios (FARAHANI *et al.* [32]). Além disso, se torna necessário a aplicação de modelos multiobjetivos como será discutido na Seção 2.3.

## 2.2 Otimização e teoria de filas

Um sistema de fila é um processo onde um usuário chega para receber um serviço pelo qual espera e sai quando o mesmo é finalizado. A espera ocorre quando a demanda é maior que a capacidade de atendimento. Ele é composto por usuários, canais de atendimento e um espaço para espera (FOGLIATTI e MATTOS [41]). Quando se trata de sistemas de filas, em geral, os usuários se deslocam até os servidores (locais de atendimento) para realizar algum tipo de serviço, como no caso de bancos e postos de gasolinas. Porém, há casos nos quais os servidores se deslocam até os usuários, como ambulâncias e reboques. As filas de usuários ficam dispersas nesses sistemas, isto é, distribuídas espacialmente (ARENALES *et al.* [37]). Assim, a teoria de filas estuda a relação entre a demanda e o atraso sofrido pelos usuários.

Existem diferentes sistemas de filas:

- Fila única e um servidor;
- Fila única e múltiplos servidores em paralelo;
- Múltiplas filas e múltiplos servidores em paralelo; e
- Fila única e múltiplos servidores em série.

Os modelos são motivados por processos de chegada e de serviço probabilísticos que resultam em uma fila, conforme pode ser observado na Figura 2.1. O processo de chegada é definido pelo intervalo de tempo entre chegadas sucessivas de usuários e o de serviço é pelo tempo de atendimento por usuário, em geral, admite-se que esse processo não varia ao longo do tempo e não é afetado pela quantidade de usuários no sistema (ARENALES *et al.* [37]). Já a disciplina da fila explica como os usuários são selecionados para atendimento. Alguns exemplos são: o primeiro a chegar é o primeiro a ser atendido (FIFO- *first in, first out*), último a chegar é o primeiro

atendido (LIFO - *last in, first out*) e sistema de prioridade (PRI) (FOGLIATTI e MATTOS [41]).

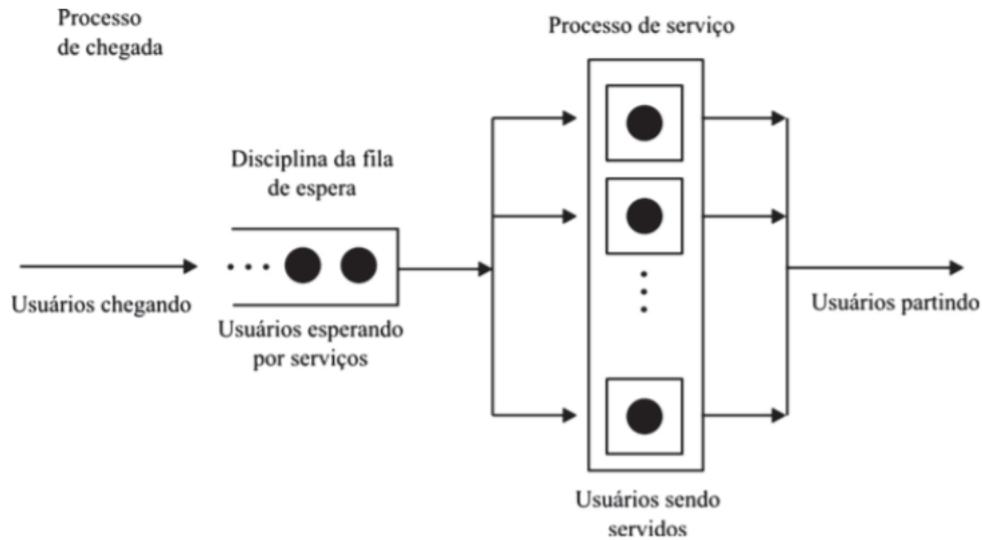


Figura 2.1: Sistema de filas.  
Fonte: ARENALES *et al.* [37].

Os modelos de filas normalmente se comportam como processos markovianos, ou seja, trata-se de processos estocásticos (probabilísticos) onde dada a informação do presente, toda a informação do passado é irrelevante para previsão futura. A cadeia de Markov homogênea, irredutível e de parâmetro contínuo é denominada processo de nascimento e morte (FOGLIATTI e MATTOS [41]) e é utilizada para representar modelos de filas. A Figura 2.2 mostra o diagrama de transição de estados do modelo de nascimento e morte no qual  $\lambda$  representa a taxa de chegada ou de ocorrência e  $\mu$  a taxa de atendimento.

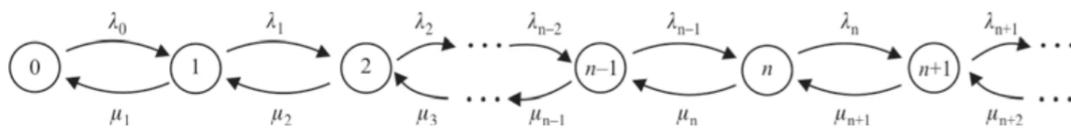


Figura 2.2: Processo de nascimento e morte.  
Fonte: ARENALES *et al.* [37].

Os modelos de fila nos quais os tempos entre chegadas e de atendimento seguem uma distribuição exponencial e possuem disciplina de atendimento FIFO são:

- $M/M/1/\infty/FIFO$  : existe um único posto de atendimento e não há limitação para o tamanho da fila;

- $M/M/1/K/FIFO$  : existe um único posto de atendimento, mas existe uma limitação  $K$  para o número de clientes no sistema;
- $M/M/c/\infty/FIFO$  : existem  $c$  postos de atendimentos e não há limitação para o tamanho da fila; e
- $M/M/c/K/FIFO$  : existem  $c$  postos de atendimentos e uma limitação  $K$  para o número de clientes no sistema.

A teoria de filas permite analisar o sistema por meio de medidas de desempenho, tais como: número médio de usuários na fila ou no sistema; e tempo médio de espera de um usuário na fila ou no sistema (FOGLIATTI e MATTOS [41]).

As medidas de desempenho da teoria de filas podem ser usadas em modelos de otimização que buscam, por exemplo, minimizar os custos para um determinado nível de serviço (ARENALES *et al.* [37]), minimizar o tempo de espera dos clientes, ou ainda minimizar a ociosidade média das instalações (PASANDIDEH e NIAKI [40]). Outros modelos apresentados na literatura utilizam a teoria de filas nas restrições. Como exemplo, WANG *et al.* [42] utilizam uma restrição em seu modelo que considera um tempo máximo de espera para o cliente.

## 2.3 Modelos de otimização multiobjetivos

Segundo COLLETTE e SIARRY [43], um problema de otimização é definido como a busca por um mínimo ou máximo (o ótimo) de uma função e eles podem ser classificados pelo número de variáveis de decisão (uma ou várias), pelo tipo da variável de decisão (contínua, inteira ou combinatória), tipo da função objetivo (linear, quadrática, não linear) e forma do problema (com restrições ou sem).

Além disso, podem ser mono ou multiobjetivo. A principal dificuldade encontrada no problema mono-objetivo é que modelá-lo usando apenas uma função objetivo pode introduzir um viés durante a fase de modelagem. Já os problemas multiobjetivos permitem um grau de liberdade, pois o objetivo passa a ser minimizar “da melhor maneira possível” as várias funções objetivo. Porém, vale ressaltar que, muitas vezes, os objetivos são contraditórios, isto é, a redução de um leva a um aumento no outro. Essa relação é conhecida na literatura como *trade-off*.

Portanto, um problema de otimização multiobjetivo pode apresentar uma infinidade de soluções, entretanto, apenas um pequeno subconjunto será de interesse. Para isso é necessário entender o conceito de dominância, pois, para uma solução ser de interesse, deve existir uma relação de dominação entre ela e as demais. As soluções não-dominadas, ou soluções ótimas no sentido de Pareto, são as que dominam

as outras, mas não se auto-dominam. Assim, a relação de dominancia e otimalidade local no sentido de Pareto são formalmente descritas a seguir (COLLETTE e SIARRY [43]):

**Definição 1** Se diz que o vetor  $\vec{x}_1$  domina o vetor  $\vec{x}_2$  se:  $\vec{x}_1$  é pelo menos tão bom quanto  $\vec{x}_2$  para todos os objetivos, e  $\vec{x}_1$  é estritamente melhor que  $\vec{x}_2$  para pelo menos um objetivo;

**Definição 2** Um vetor  $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$  é um ótimo local no sentido de Pareto se existir um real  $\delta > 0$  de modo que não há vetor  $\vec{x}'$  que domina o vetor  $\vec{x}$  com  $\vec{x}' \in \mathbb{R}^n \cap B(\vec{x}, \delta)$ , onde  $B(\vec{x}, \delta)$  representa um círculo com centro  $\vec{x}$  e raio  $\delta$ ;

**Definição 3:** O conjunto não dominado para a totalidade do espaço de busca factível  $S$  é chamado de conjunto ótimo de Pareto global. As soluções contidas neste conjunto são soluções ótimas do problema multiobjetivo; e

**Definição 4:** A Fronteira de Pareto é formada pelo conjunto de vetores de funções objetivo  $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x))^T$ , para cada solução  $x$  que está no conjunto ótimo de Pareto.

Sendo assim, conforme Figura 2.3, um vetor  $\vec{x}$  é localmente ótimo no sentido de Pareto se for ótimo com uma restrição no conjunto  $\mathbb{R}^n$ .

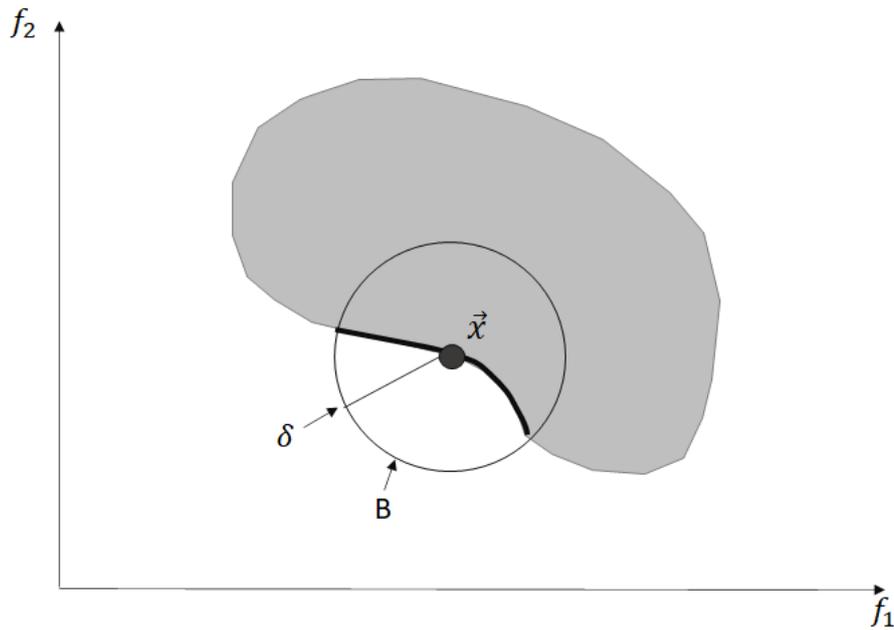


Figura 2.3: Ótimo local no sentido de Pareto.  
Fonte: COLLETTE e SIARRY [43].

Em outras palavras, DEB [44] mostra as seguintes propriedades do conjunto dominado e do não-dominado: qualquer solução do conjunto não-dominado deve ser não-dominada em relação a outra solução desse mesmo conjunto e qualquer solução não contida no conjunto não-dominado deve ser dominada, no mínimo, por uma solução do conjunto não-dominado. Assim, o conjunto não-dominado é denominado

conjunto ótimo de Pareto. Alguns exemplos são demonstrados na Figura 2.4 onde as fronteiras definidas em vermelho representam o conjunto ótimo de Pareto dos problemas correspondentes.

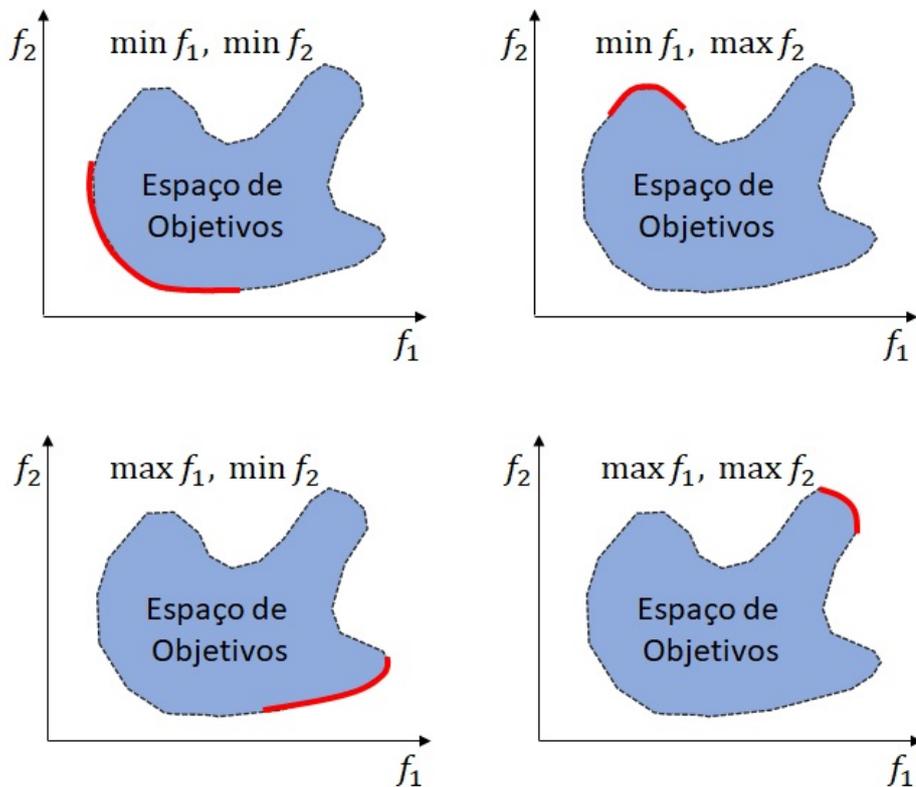


Figura 2.4: Conjuntos ótimos de Pareto.  
 Fonte: LOBATO [38].

De acordo com LOBATO [38], todas as soluções ótimas de Pareto são igualmente importantes quando não existem informações específicas que correlacionam os objetivos como, por exemplo, a ordem de prioridade de cada um deles.

Dada a dificuldade intrínseca dos problemas multi-objetivos, DEB [44] mencionam que a meta em uma otimização multiobjetivo é: encontrar um conjunto de soluções o mais próximo possível da Fronteira de Pareto, com uma grande diversidade.

## 2.4 Métodos clássicos de solução dos problemas multiobjetivos

De acordo com DEB [44], os métodos de solução dos problemas multiobjetivo podem ser de geração ou baseados em preferência. No primeiro caso, algumas soluções não-dominadas são geradas para os tomadores de decisão sem nenhum conhecimento a

priori da importância relativa de cada objetivo. Já no segundo caso, é necessário ter conhecimento das preferências por cada objetivo para o processo de otimização. Devido a essas características, as seguintes estratégias de solução são propostas na literatura:

- Sem preferência;
- Posteriori;
- A priori; e
- Interativos.

No caso do método de solução sem preferência não é necessário nenhuma informação sobre a importância dos objetivos e uma heurística é utilizada de forma que apenas uma única solução é encontrada. Já os métodos a posteriori utilizam informações de preferência para cada objetivo e geram o conjunto de soluções ótimas de Pareto de forma iterativa. Os métodos a priori utilizam mais informações sobre as preferências entre objetivos e normalmente acham uma solução ótima de Pareto preferida, portanto os resultados dependem muito das preferências iniciais. Os métodos interativos usam informações de preferência de forma progressiva no decorrer do processo de solução.

Alguns métodos clássicos utilizados são (DEB [44]):

- **Método da soma ponderada:** consiste na transformação do problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo através da atribuição de pesos para cada objetivo. Os resultados obtidos através deste método são fortemente dependentes dos pesos adotados. Além disso, para os objetivos terem a mesma importância, os valores de cada função objetivo devem estar próximos uns dos outros. Esse método é bastante intuitivo, mas não garante encontrar todos os pontos do Pareto ótimo, principalmente em problemas não-convexos;
- **Método  $\varepsilon$ -Constraint:** consiste na otimização do objetivo mais importante sujeitando-se a restrições que envolvam os demais. O  $\varepsilon$  representa um limite superior para cada nova restrição incorporada ao modelo e não significa necessariamente um pequeno valor próximo de zero. Em termos de informações necessárias, esse método é muito semelhante ao da soma ponderada. A desvantagem é que o modelo depende largamente da escolha dos valores de  $\varepsilon$  que devem considerar todas as novas restrições incorporadas. Assim, quanto maior o número de funções objetivo, maior o número de elementos no vetor  $\varepsilon$  (DEB [44]);

- **Método do produto ponderado:** ao invés de usar soma ponderada, esse método utiliza métricas ponderadas. Ele se baseia em fazer com que funções de diferentes ordens tenham importâncias similares. É necessário normalizar as funções objetivos, o que torna importante o conhecimento dos valores máximos e mínimos de cada uma, além disso, o método necessita de uma solução ideal e todos os objetivos precisam ser otimizados de forma independente para definir a métrica (DEB [44]);
- **Método de Benson:** se assemelha ao do produto ponderado, exceto que a solução de referência é considerada uma solução flexível não ótima de Pareto. Essa solução é escolhida de maneira aleatória na região factível. Como desvantagem observa-se que ele pode não gerar todas as soluções eficientes e as soluções encontradas dependem muito da solução inicial obtida aleatoriamente;
- **Método da função utilidade:** o usuário fornece uma função utilidade relativa a todos os objetivos e diferentes soluções ótimas de Pareto são encontradas mudando os parâmetros envolvidos na função. Essa solução pode ser interessante se uma função utilidade estiver disponível, porém há riscos ao utilizar uma que seja muito simplificada (DEB [44]);
- **Método de programação por metas:** busca encontrar uma solução que atinja metas pré-definidas para cada uma das funções objetivo, porém, o método busca minimizar os desvios em relação às metas se não existir uma solução que satisfaça esse critério. Cada meta se torna pelo menos uma restrição de igualdade e o problema passa a ser minimizar todos os desvios (LOBATO [38]); e
- **Método iterativo:** o principal aspecto desse processo é que o tomador de decisão deve prover algumas informações sobre a direção da busca durante a otimização, tal como pesos e pontos de referência. Essa técnica é popular na prática, porém, por envolver o tomador de decisão no processo, ela perde sua simplicidade (DEB [44]).

Em resumo, DEB [44] mostra que os métodos de soluções clássicos convertem os problemas multiobjetivos em mono-objetivos e sempre precisam de certo conhecimento do problema para serem utilizados, apesar disso, possuem um grande número de vantagens e são utilizados na solução de problemas reais.

# Capítulo 3

## Revisão bibliográfica sobre incidentes de tráfego

Este capítulo apresenta um referencial teórico importante para a pesquisa proposta. De maneira específica, são considerados os seguintes temas: incidentes de tráfego e modelos de localização destacando aqueles empregados na localização de veículos de atendimento.

### 3.1 Incidentes de tráfego

Um incidente é qualquer evento que cause interrupção no fluxo de tráfego normal da via (TRB [45]). Eles geram diversos tipos de deseconomia, como o aumento no tempo de viagem, acidentes secundários, poluição do ar, aumento do consumo de combustível e piora na qualidade de vida da população.

É estimado que os incidentes causam 50% do total de atraso das viagens (FHWA [46]), sendo que 25% deles são colisões, enguiços mecânicos, detritos na estrada e derramamento de carga. Portanto, os incidentes são uma das principais fontes de congestionamento (HOJATI *et al.* [8]).

TRB [45] mostra como se dá a redução de capacidade devido aos incidentes de tráfego em vias com duas a oito faixas por direção. Essa redução depende da quantidade de faixas bloqueadas por eles, como pode-se observar na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Proporção da capacidade da via expressa liberada no momento do incidente .

Número de faixas por direção	Acidente no acostamento	Uma faixa bloqueada	Duas faixas bloqueadas	Três faixas bloqueadas
2	0,81	0,35	0,00	Não aplica
3	0,83	0,49	0,17	0,00
4	0,85	0,58	0,25	0,13
5	0,87	0,65	0,40	0,20
6	0,89	0,71	0,50	0,26
7	0,91	0,75	0,57	0,36
8	0,93	0,78	0,63	0,41

Fonte: TRB [45]

A duração de um incidente de tráfego é dividida em quatro etapas: detecção ou verificação (tempo para coletar e analisar os dados relacionados ao incidente); resposta (tempo entre a detecção do incidente e a chegada da equipe); limpeza (tempo entre a chegada da equipe de suporte e o término do serviço); e recuperação (tempo entre o final da limpeza e o retorno do fluxo de tráfego ao estado normal) (FHWA [46]).

Em relação à duração dos incidentes, CHIMBA *et al.* [47] concluíram que o número de vias bloqueadas, o comprimento da fila formada em consequência dos mesmos e o envolvimento de caminhões e reboques são fatores que tornam os incidentes mais longos. Outros fatores que influenciam na duração de um incidente são os métodos de detecção, condições de tráfego e serviço de resgate (HAULE *et al.* [48]) e tipo de incidente (HOU *et al.* [49]).

As perdas e a influência geral causadas por incidentes de trânsito são proporcionais ao tempo que o incidente continua afetando a via e prejudicando a circulação. A detecção prematura nesses casos é essencial para definir uma estratégia de resposta eficaz, que pode reduzir significativamente os atrasos nas viagens, melhorar a segurança no trânsito e otimizar o controle de tráfego em tempo real (YUAN e CHEU [14]). Já os tempos de resposta e liberação de incidentes são frações do tempo total de incidentes que são impactadas diretamente pelas estratégias de resposta criadas pelos órgãos responsáveis por esse gerenciamento.

Identificar e quantificar os fatores que influenciam nos tempos de resposta e liberação dos incidentes pode beneficiar o gerenciamento de incidentes e, consequentemente, mitigar o impacto do congestionamento não recorrente (MA *et al.* [15]). Portanto, qualquer plano de resposta a incidentes eficaz deve fornecer resposta e tempos de liberação razoáveis e deve identificar todos os fatores relacionados a essas

atividades (ZOU *et al.* [50]).

Segundo STEENBRUGGEN *et al.* [51], na prática, a gestão de incidentes é um conjunto de medidas que visa minimizar os efeitos negativos nas condições de segurança e no fluxo do tráfego, ela é de grande importância para as agências de transporte (ZOU *et al.* [50]). Além dos ferimentos, mortes e custos médicos, congestionamentos, atrasos e poluição causados por incidentes são um problema para os viajantes e para o meio ambiente.

Assim, o problema de gerenciamento de incidentes pode ser resumido como: (i) estocástico, devido à forma que os incidentes ocorrem; (ii) um problema de rede, já que os incidentes ocorrem de maneira aleatória em uma rede; e (iii) de alocação de recursos, a fim de maximizar a utilização dos equipamentos, normalmente reboques, empregados na operação de atendimento (OZBAY *et al.* [23]).

Em relação ao tempo de limpeza, LI e WALTON [52] apresentaram um modelo de simulação e concluíram que o tamanho da área de patrulha dos reboques reflete mais na relação custo-benefício do que no número de veículos de resposta disponíveis.

Portanto, explorar o perfil de incidentes, a fim de procurar alternativas para reduzir o número de ocorrências, e melhorar as operações de serviço, para reduzir o impacto negativo dos incidentes, são tarefas importantes na redução da quantidade de congestionamento não recorrente, da poluição atmosférica e dos atrasos gerados.

## 3.2 Impactos gerados pelos incidentes de tráfego

Uma das justificativas utilizadas pela ONU [53] ao anunciar a Segunda Década de Ação pela Segurança do Trânsito (2021-2030) foi exatamente a necessidade de atendimento aos ODS, mencionados no Capítulo 1, o que demonstra uma forte ligação entre os sinistros de trânsito e a sustentabilidade. O estabelecimento de políticas públicas e ações de mitigação que realmente controlem a concentração de poluentes atmosféricos em áreas urbanas tem sido um grande desafio para os tomadores de decisão (MAES *et al.* [54]). Isso porque o processo de desenvolvimento de estratégias eficientes, que reduzam as emissões de poluentes na área de transportes, deve considerar a participação de todos os atores envolvidos na operação do setor, como órgãos públicos, planejadores de transporte, motoristas, pedestres, concessionárias de transporte público e empresas de logística.

Dentro do contexto urbano, os incidentes de tráfego são responsáveis por impactos negativos nos três aspectos tocantes da sustentabilidade, o social, o econômico e o ambiental. Dependendo do nível de serviço em que a via está trabalhando, a ocorrência de incidentes aumentam o congestionamento, que já é um problema crescente nas cidades, e a consequência deles são aumento do tempo de viagem (atraso), problemas de saúde por causa da poluição e acúmulo de emissões de GEE (BRENT

e BELAND [55]). Outra consequência negativa dos incidentes é a ocorrência de acidentes secundários. SALUM *et al.* [56] mostraram em seu estudo que o aumento de um minuto na duração do impacto do incidente aumentou a probabilidade de um acidente secundário em 1,2%. Fatores como aumento no volume de tráfego horário, duração do impacto do incidente e a porcentagem de faixas fechadas aumentam significativamente a probabilidade de um incidente secundário. Além disso, incidentes moderados e graves, colisão, dias da semana, horários de pico e incidentes envolvendo reboque apresentaram uma alta probabilidade de resultar em um acidente secundário (SALUM *et al.* [56]).

Quanto ao impacto social, observa-se que o incidente traz impactos ligados à qualidade de vida e ao aparato urbano. Quando a qualidade de vida é considerada, nota-se que os incidentes são responsáveis por uma piora na saúde física, mental e no tempo de viagem. Sabe-se também que os incidentes de trânsito são responsáveis pelo aumento do risco de morte não natural e de lesões graves.

WHO [57] afirma que aproximadamente 1,3 milhão de pessoas morrem a cada ano nas estradas do mundo e entre 20 e 50 milhões sofrem lesões não fatais. Em um levantamento de dados de 2016 realizado por WHO [57], o Brasil foi o país com a terceira maior quantidade de mortos por sinistros de trânsito no mundo, superado somente pela Índia e pela China. Além disso, o trânsito é a principal causa de morte entre os jovens em um contexto mundial e os países de baixa e média renda possuem taxas de mortalidade por lesões no trânsito mais do que duas vezes superiores aos países de alta renda (OMS [58]), deixando mais clara a disparidade de desenvolvimento entre eles. Vale ressaltar que, segundo SANCHEZ-MANGAS *et al.* [59], os fatores mais relevantes que explicam a probabilidade de morte em um acidente são associados a variáveis relacionadas ao indivíduo e, mais especificamente, ao não uso de medidas de segurança (por exemplo, cintos de segurança ou outros elementos de segurança), já outro fator relevante é o consumo de álcool, medicamentos ou drogas, que impactam fortemente na capacidade de raciocínio dos motoristas.

Sabendo que os incidentes são um dos principais responsáveis pelos congestionamentos não recorrentes (HAAS [60]), fica claro que eles também impactam a saúde e a qualidade de vida daqueles indivíduos que não estão diretamente envolvidos nos incidentes, pois, conforme mostram REQUIA *et al.* [61], existe uma correlação direta entre as emissões relativas ao tráfego e a saúde humana.

Os atrasos e a imprevisibilidade nos tempos de viagem entre origens e destinos também afetam a qualidade de vida da população urbana. NOLAND *et al.* [62], por exemplo, mostram que os tempos de viagem não confiáveis gerados pelo congestionamento não-recorrente afetam as pessoas por atrasar o cronograma de suas atividades, podendo até levar ao cancelamento de uma delas, além disso, essa imprevisibilidade pode gerar alguma forma de ansiedade ou causar alguns custos

adicionais de planejamento. Reverberando a isso, KABIT *et al.* [63] afirmam que o atraso induzido por incidente é um dos indicadores mais importantes para quantificar os impactos dele no trânsito. Portanto, é essencial eliminar as ocorrências o mais rápido possível (HAULE *et al.* [64]) para reduzir as incertezas, visto que prever as condições de tráfego nas redes urbanas é uma prioridade para os centros de gerenciamento de tráfego e isso se torna desafiador quando a rede é afetada por incidentes de tráfego que variam no tempo e no espaço (SHAFIEI *et al.* [65]).

Além do impacto na qualidade de vida causado pelos congestionamentos, ressalta-se que os sistemas de transporte desempenham um papel crítico para o deslocamento diário, logística e viagens de negócios e que um sistema com falhas leva a maiores perdas no tempo de viagem e custos incorridos por viagens remarca-das (HSIEH e FENG [66]). Portanto, os incidentes também causam impacto direto no aparato urbano.

Nesse ponto, destaca-se a necessidade de resiliência das cidades, já que o funci-onamento bem-sucedido delas depende muito do bom funcionamento dos diferentes sistemas de infraestrutura (REINER e MCELVANEY [67]) e uma interrupção na capacidade (caso dos incidentes) pode levar a uma interrupção em outra rede (GUI-DOTTI *et al.* [68]). Destaca-se assim que, segundo BALAL *et al.* [69], existem cinco parâmetros para analisar a resiliência de uma via: comprimento da fila, velocidade do segmento, tempo de viagem do segmento, atraso na via da ocorrência e atraso da rota de desvio. Nota-se que todos eles podem ser afetados quando são observadas ocorrências de incidentes.

A falta de resiliência e as grandes filas de congestionamentos não-recorrentes reduzem a atratividade da cidade, pois acarretam desconfianças na confiabilidade dos sistemas de transporte urbano. Uma rede rodoviária confiável depende da eficiência da infraestrutura e seus serviços e de como as operações podem ser restauradas com sucesso após um desastre (HSIEH e FENG [66]). Além disso, essas filas geram atraso nas viagens e perda de produção difíceis de mensurar.

Um estudo realizado por GENG *et al.* [70] mostrou que o congestionamento do tráfego, a poluição, o ruído e as taxas de criminalidade mais altas afetam negativa-mente os preços das moradias. Uma pesquisa realizada em Florença concluiu que o congestionamento da região central fez com que atividades cada vez mais proemi-nentes se deslocassem para áreas em desenvolvimento, que é hoje uma das partes mais atraentes de todo o assentamento (MA *et al.* [71]).

Quanto ao impacto econômico, é necessário considerar tanto os custos diretos, quanto os indiretos, para se ter uma noção mais exata do custo real de um incidente, já que grande parte deles são subvalorizados ou considerados impossíveis de estimar, pois, por serem custos das externalidades relacionadas ao tráfego, não possuem valor de mercado (JAKOB *et al.* [72]). Existem seis custos associados aos incidentes WIT

e METHORST [73]): (i) Custo médico: gasto com hospital, por exemplo; (ii) Perda de produção, devido a doença, invalidez permanente ou morte; (iii) Custo intangível, como o sofrimento e a dor; (iv) Custo material, que inclui as perdas à propriedade; (v) Custo do serviço de emergência, como bombeiros; e (vi) Custo do atraso, devido ao congestionamento de tráfego.

KABIT *et al.* [63] ressaltam que o custo do atraso é uma função do tempo do ocupante, despesas operacionais do veículo e custos externos, como poluição do ar, portanto a gestão eficiente do tráfego pode ter um impacto positivo no crescimento econômico; o que impõe uma pressão e um grande desafio às agências locais de gerenciamento de tráfego para fornecer seus serviços de forma mais eficaz e eficiente, visando mitigar os impactos do congestionamento devido a eventos recorrentes e não recorrentes.

Vale ressaltar que os mesmos autores afirmam que os custos extras de operação do veículo (consumo de combustível), bem como os custos de emissão, são diretamente afetados pelo atraso resultante e pela redução da velocidade média dos segmentos afetados.

No Brasil, o custo dos sinistros com vítimas está ligado principalmente a perda de produção (42,8%) e aos danos à propriedade (30%), já os custos médico-hospitalares representam 15,9% (LIMA [74]; IPEA [75]). Além dos custos citados acima, BRENT e BELAND [55] mostraram que o congestionamento de tráfego desacelera os caminhões de bombeiros que chegam ao local de uma emergência e esse atraso aumenta o dano monetário médio dos incêndios.

Também tratando da resposta a incidentes, SANCHEZ-MANGAS *et al.* [59] mostraram que o tempo de resposta médica aparece como uma variável significativa para explicar a probabilidade de morte. Os resultados sugerem que uma redução de 10 minutos no tempo de resposta pode estar estatisticamente associada a uma diminuição média da probabilidade de morte em um terço.

Já analisando o impacto ambiental, os incidentes geram o aumento das emissões de poluentes atmosféricos e GEE, que intensificam o aquecimento global e, conseqüentemente, a mudança climática, e ampliam o esgotamento dos recursos naturais em função do maior consumo de combustíveis fósseis. Estudos mostram que as taxas de emissão dos veículos que trafegam em zonas de obra ou em incidentes aumentam (AVETISYAN *et al.* [76]) e que as emissões devido ao congestionamento não recorrente gerado por obras viárias são maiores se comparado com as filas de congestionamentos recorrentes (ZHANG *et al.* [12]). Dessa forma, muitos estudos têm buscado quantificar o impacto ambiental gerado pelos congestionamentos (BAI *et al.* [3], ZHANG *et al.* [12], AVETISYAN *et al.* [76], JOO *et al.* [77]).

Em AVETISYAN *et al.* [76], os autores usaram a simulação microscópica de tráfego foi usada para capturar os efeitos das emissões dos parâmetros operacionais

dos veículos considerando as diferentes tecnologias veiculares, mudança do volume de tráfego, incidentes e obras viárias. Eles desenvolveram modelos multivariados não lineares para estimar as emissões de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $THC$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$ . Os autores realizaram um estudo de caso em Marilândia, Estados Unidos, incluindo conexões arteriais e rodovias. Seus resultados mostraram que a composição veicular afeta muito a quantidade de emissões e que regiões com incidentes e obras viárias sofrem um aumento nas emissões por veículo ao longo da rede de simulação.

Experimentos de campo foram conduzidos por ZHANG *et al.* [12] para examinar as emissões de veículos leves e pesados ao longo de um segmento de rodovia sob fluxo livre, sob congestionamento nas horas de pico e em locais com obra viária. Os dados coletados foram suavizados e utilizados no *Comprehensive Modal Emissions Model* (CMEM [78]). De acordo com os autores, considerando o efeito combinado do comportamento de direção, volume, composição veicular e fatores de emissão, as concentrações de  $CO$ ,  $HC$  e  $NO_x$  devem quase dobrar durante os períodos de horário de pico e congestionamento devido a obras viárias em comparação com os períodos de fluxo livre. Os resultados destacaram a importância do congestionamento para as avaliações de emissão, exposição e risco à saúde.

O Simulador de Emissão de Veículo Motorizado (MOVES), desenvolvido por LIN e YU [79], foi empregado por JOO *et al.* [77] para estimar as emissões de autoestradas para condições de tráfego com e sem ocorrências em uma rodovia real, com base na detecção de veículos em tempo real, registros de sinistros e informações meteorológicas. O *California Puff Model* (CALPUFF MODELING SYSTEM [80]) também foi usado para analisar a dispersão do ar causada por sinistros. Os resultados do MOVES mostraram que os níveis de  $NO_x$  e  $PM_{2,5}$  para condições de tráfego envolvidas em sinistros eram maiores do que para condições normais. A análise conduzida usando CALPUFF mostrou que as áreas de exposição à poluição do ar relacionadas ao tráfego eram áreas próximas à rodovia dentro de um raio de 1 km do local do acidente. Os autores por regressão identificaram os fatores contribuintes que afetam a gravidade das emissões veiculares, e os resultados indicaram alto volume de tráfego, baixa temperatura e sinistros que levaram a uma fatalidade durante a noite e hora pico como os principais determinantes. Os autores recomendaram as seguintes estratégias de melhoria da saúde pública relacionadas ao tráfego para mitigar o impacto das emissões: o estabelecimento de um distanciamento adequado entre rodovias e áreas residenciais densamente povoadas, a integração de informações em tempo real sobre sinistros de trânsito e informações sobre a dispersão da poluição do ar, e a adoção de sistemas de limite de velocidade variável e operações de faixa para veículos pesados a diesel que geram grandes quantidades de emissões de  $NO_x$  e  $PM_{2,5}$ .

Os incidentes de tráfego (tráfego pesado, condições climáticas adversas e sinistros

de trânsito) causam um aumento na frequência e intensidade de aceleração e desaceleração. O resultado desse movimento é um aumento muito significativo no consumo de combustível (MAGAÑA e MUÑOZ-ORGANERO [81]). DIA e GONDWE [82] estimaram que a redução da duração de um incidente de pista dupla de 30 para 15 minutos resultou em reduções de 11,2% no consumo de combustível.

Outra externalidade gerada pelo tráfego é a sonora. RIEDEL *et al.* [83] afirmam que a exposição ao ruído e à poluição do ar são determinantes conhecidos da saúde da população e podem afetar a vida das pessoas.

Diversos outros estudos investigam a relação entre velocidade e emissões (HICKMAN [84], SMIT *et al.* [85], ABOU-SENNA e RADWAN [86]). BAI *et al.* [3] usaram como base o método MEET (*Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport*) proposto por HICKMAN [84] para examinar o impacto da implantação de uma faixa prioritária em uma rede real de transporte urbano a partir da perspectiva de emissão de carbono que incorpora o impacto ambiental e a condição do tráfego. O método MEET se baseia em medições realizadas em campo e é usado para calcular emissões de transporte em gramas por quilômetro para diversos tipos de veículo baseado na velocidade de tráfego. As análises computacionais de BAI *et al.* [3] baseadas em dados reais de tráfego mostraram que a estratégia de reserva de faixa melhora a eficiência dos transportes nas faixas reservadas e também melhora a poluição do ar.

Um método de pós-processamento foi desenvolvido por SMIT *et al.* [85] para prever distribuições de velocidade média usando dados de tráfego disponíveis no modelo de tráfego macroscópico dinâmico Indy (BLIEMER *et al.* [87]), que foi testado para uma rede do mundo real. Os autores compararam dois modelos de emissão: o modelo de emissão de velocidade média contínua COPERT IV (NTZIACHRISTOS *et al.* [88]) e o modelo de situação de tráfego quantitativo discreto VERSIT +<sup>macro</sup> (SMIT *et al.* [89]) para investigar se a consideração das distribuições de velocidade média em estradas em comparação com a velocidade média única levaria a resultados diferentes na modelagem de emissão de grandes redes de estradas. Os cálculos mostraram que as emissões totais da rede de  $CO$ ,  $HC$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$  e  $CO_2$  são geralmente (mas nem sempre) aumentadas após a aplicação do método de distribuição de velocidade média em até +9%, e mesmo até +24% no nível da sub-rede (urbano, rural, autoestrada). Assim, os métodos convencionais de computação pareceram produzir resultados enviesados (uma subestimação).

Observando os impactos tanto social como econômico e ambiental, é importante definir estratégias para minimizar tanto a ocorrência de incidentes quanto suas consequências. Essas ações que podem ser empregadas serão discutidas ao longo da próxima seção.

### 3.3 Ações a serem empregadas para reduzir o impacto dos incidentes

Para aumentar a segurança no trânsito e, assim, reduzir os incidentes rodoviários, tanto motoristas quanto pedestres precisam entender sua responsabilidade social e as instituições públicas precisam legislar para alcançar um nível mais alto (HAQUE *et al.* [90]). Diversas ações podem ser implementadas para criar um sistema de mobilidade seguro nas vias, tais como: (i) construir cidades compactas e conectadas; (ii) desenhar vias mais inteligentes; (iii) oferecer uma variedade de opções de mobilidade segura; (iv) manter as velocidades em níveis de segurança; (v) fazer cumprir as leis e regulamentos existentes; (vi) proporcionar uma melhor educação para motoristas e planejadores urbanos; (vii) exigir padrões universais de segurança veicular; e (viii) acelerar a resposta de emergência (WELLE *et al.* [91]).

Devem ser feitos esforços, tanto em nível governamental quanto individual, para reduzir as fatalidades em sinistros de trânsito, para isso é necessária uma implementação estrita das leis de trânsito (KHURSHID *et al.* [92]). Um exemplo de modificações que podem ser implementadas proposta por ROSSI *et al.* [93] é a redução de velocidade. Os autores demonstraram que implementar limites de velocidade de 30 km/h em uma cidade traz benefícios para a saúde devido à redução de sinistros de trânsito, das mortalidades advindas deles e a exposição ao ruído.

Estudando veículos enguiçados, CHAND *et al.* [94] mostraram que o aumento na densidade populacional, no número de veículos registrados, no número de feriados, na temperatura média, no percentual de veículos pesados e no percentual de empregos de escritório (empregos gerenciais e administrativos) em uma região aumentam geram em consequência o aumento no número de ocorrências. Já o estudo de FRIEDMAN *et al.* [95] demonstrou que a incidência de sinistros de veículos motorizados relacionados ao álcool atendidos no centro de trauma diminuiu após a introdução de serviços de compartilhamento de carona, mostrando que essa pode ser uma das soluções para prevenir esse tipo de acidente.

Vale ressaltar que um estudo de VAROTTO *et al.* [96] mostrou que o congestionamento do tráfego e as taxas de sinistros podem ser reduzidos com a introdução de limites de velocidade variável (VSLs) e com esses sistemas de detecção automática de incidentes (AID), mostrando que eles podem tornar a via mais segura.

As iniciativas de redução de incidentes também podem incluir a utilização de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), que permitem, por exemplo, uma melhor coordenação entre os responsáveis pela gestão de incidentes e a utilização pelos motoristas de serviços de assistência nas estradas. A eficiência energética e a redução de emissões tornaram-se argumentos essenciais para os investimentos em ITS (CHEN *et al.* [97]). Além disso, os autores indicam que, para cidades em países

em desenvolvimento, o foco desses investimentos deve ser em infraestrutura básica, incluindo uma rede viária coerente e medidas básicas de gestão de tráfego. Portanto, o investimento em ITS é uma estratégia importante para reduzir as externalidades negativas geradas pelos incidentes. Também é importante destacar que é possível focar em tecnologias veiculares como a direção autônoma para essa redução.

Já tratando dos motoristas que são impactados devido a fila de congestionamento gerada pelo incidente, BASSO *et al.* [98] demonstraram que os painéis de mensagens variáveis são eficazes, especialmente para desviar o tráfego durante incidentes na rodovia ou induzir à redução da velocidade. Mostraram ainda que motoristas de veículos pesados e de baixa quilometragem são mais propensos a seguir as mensagens.

Outra medida que pode ser adotada, desta vez para reduzir o tempo total do incidente, é o reposicionamento dos veículos de serviço (GEROLIMINIS *et al.* [22], ZHU *et al.* [99], ADLER *et al.* [100], BALTAR *et al.* [101]). Esses modelos de localização serão discutidos na Seção 3.4.

Portanto, com uma gestão de incidentes mais eficaz e a redução das emissões de  $CO_2$ , principal contribuinte para o aumento das emissões de GEE, é possível: minimizar impacto social causado pelos incidentes como aumento do tempo de viagem, estresse, inalação de poluentes e outros; tornar as cidades mais seguras devido à respostas mais rápidas, o que reduz os acidentes secundários, aumentando a segurança no trânsito; e reduzir o congestionamento que impacta no consumo de combustível. Vale ressaltar que todas essas ações estão alinhadas aos objetivos e metas da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU [27]).

No que tange ao impacto dos incidentes em relação às emissões de  $CO_2$ , destaca-se que BALTAR *et al.* [102] aplicaram o modelo MEET para analisar o impacto de incidentes nas emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) em vias expressas. Para a realização dos testes do estudo de caso foram utilizados dados reais de aproximadamente 2.800 incidentes ocorridos na Avenida Brasil, principal via expressa da cidade do Rio de Janeiro, fornecidos pela Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade do Rio de Janeiro (CET-Rio). Os resultados indicaram que os incidentes aumentam em 22% as emissões de  $CO_2$ , que os veículos enguiçados são os incidentes com maior impacto nessas emissões devido às suas altas frequências, e que os horários de pico matutino e vespertino são responsáveis por 82,4% do aumento das emissões de  $CO_2$  relacionadas aos incidentes. Além disso, por meio de mapas de calor, foi possível verificar os trechos com maiores incidentes, bem como aqueles com as maiores emissões de  $CO_2$ .

### 3.4 Modelos de localização envolvendo o gerenciamento de incidentes

Os problemas de localização de facilidades basicamente buscam localizar uma instalação com o objetivo de minimizar o custo ou qualquer outra perda ou maximizar um benefício ou o lucro (FRANCIS *et al.* [103]). Segundo CHUNG e TCHA [104], há uma diferença entre o setor privado e o público. Enquanto o primeiro busca minimizar o custo total atendendo a determinados requisitos de demanda, o segundo busca aumentar grau de satisfação social pela utilização eficiente dos recursos.

Os parâmetros normalmente considerados nos problemas de localização envolvem: conjunto de clientes, conjunto de locais candidatos à localização das facilidades, a demanda do cliente, a distância entre o cliente e a facilidade, o custo fixo e custo de atender a demanda e a capacidade da facilidade (ARENALES *et al.* [37]).

A localização dos veículos de atendimento a incidentes afeta diretamente os tempos de resposta e liberação, portanto, otimizar suas localizações torna-se uma tarefa importante. Para reduzir o tempo de resposta dos incidentes nas vias afetadas, os reboques devem estar bem localizados, ou seja, próximos dos locais que apresentam maiores problemas historicamente, com áreas de serviço bem definidas, uma característica bem conhecida dos problemas de localização, como  $p$ -medianas e de máxima cobertura.

Nesse sentido, YIN [105] buscou maximizar a eficácia dos serviços de atendimento de incidentes, com base em sua configuração e tamanho da frota com uma metodologia de dois níveis. Além disso, o tempo total de viagem na minimização considerou o pior cenário possível, ou seja, a redução da capacidade na via devido aos incidentes.

Um modelo de programação inteira mista foi proposto por PAL e BOSE [106] para encontrar os melhores locais dos depósitos para estacionamento dos veículos de emergência utilizados na resposta aos incidentes e, ao mesmo tempo, definir os veículos que devem ser posicionados nesses pontos de modo que os atendimentos sejam realizados de forma eficiente a um custo mínimo. Eles geraram resultados numéricos para um exemplo e conduziram uma análise de sensibilidade para explorar as relações entre seus parâmetros.

ADLER *et al.* [100] consideram que os veículos de atendimento devem estar próximos dos locais com incidentes e próximos dos locais onde ocorrem muitas infrações de trânsito, pois, neste caso, os reboques, além de atenderem os incidentes, também fiscalizam a via. Os autores propuseram uma formulação matemática do problema de cobertura. O modelo foi aplicado a um estudo de caso e os reboques foram localizados em pontos próximos a locais com incidentes e grandes fluxos de tráfego.

Um modelo de fila espacial foi proposto por GEROLIMINIS *et al.* [22] para lo-

calizar veículos de emergência em redes urbanas considerando as características de demanda espacial e temporal, com a probabilidade de que um veículo não esteja disponível quando necessário, o que gera uma fila de espera. Eles também consideraram que as taxas de serviço não eram idênticas, pois poderiam variar de acordo com os veículos de atendimento e as características do incidente. O modelo, baseado no problema de máxima cobertura, foi aplicado a dados do mundo real e os resultados foram comparados com os modelos de cobertura e  $p$ -medianas existentes. O modelo provou ser eficaz principalmente nos horários de pico, quando as filas são formadas.

Um modelo de enfileiramento aproximado baseado em GEROLIMINIS *et al.* [22] e processos Markovianos foi introduzido por AKDOGAN *et al.* [107] para localizar veículos de emergência em redes Euclidianas e espaciais, a fim de satisfazer um requisito de cobertura pré-definido. Usando simulação de eventos discretos, diferentes soluções de localização foram analisadas em termos de tempo médio de resposta aos incidentes. As demandas foram assumidas seguindo um processo de Poisson homogêneo ao longo do tempo, enquanto os tempos de atendimento foram distribuídos exponencialmente com média conhecida, definidos em função da localização da demanda e da localização dos veículos de emergência.

Modelos não lineares inteiros mistos determinísticos e estocásticos foram utilizados por LOU *et al.* [24] para localizar veículos de atendimento nas rodovias responsáveis por detectar, responder e limpar incidentes de tráfego. O modelo determinístico assume que existe apenas um cenário de ocorrência do incidente, e o modelo estocástico considera vários, cada um com sua probabilidade de ocorrência. O principal objetivo de ambos os problemas é minimizar o tempo total de resposta a incidentes. Para obter soluções em um tempo razoável, três heurísticas foram propostas e aplicadas a experimentos numéricos baseados em dados do mundo real.

Visando também reduzir o tempo de resposta a incidentes, OZBAY *et al.* [23] levaram em consideração a probabilidade de ocorrências de incidentes com diferentes cenários quanto à quantidade de veículos de serviço disponíveis. No modelo matemático, os autores consideraram as localizações dos reboques e dos depósitos e introduziram um conceito relacionado à qualidade do serviço, que mede a probabilidade de ter recursos disponíveis para atendimento dos incidentes. Por fim, um estudo de caso detalhado foi incluído para demonstrar o uso do modelo proposto em um contexto do mundo real.

Considerando uma abordagem estocástica, ZHU *et al.* [99] estudaram a alocação dos reboques em um problema que permitia a possibilidade de ocorrer até dois incidentes ao mesmo tempo. Os autores visaram reduzir o tempo total de liberação, além de definir as áreas de atuação de cada reboque. Eles conduziram experimentos numéricos substanciais com base em dados do mundo real, concluindo que a eficácia

de suas estratégias de resposta variava com a distribuição espacial da frequência de incidentes em diferentes momentos do dia, o tamanho da frota da equipe de resposta, o nível de congestionamento e as formas de detecção.

A presente pesquisa já originou quatro artigos, sendo três publicados em periódicos (BALTAR *et al.* [101], BALTAR *et al.* [108] e BALTAR *et al.* [109]). Em BALTAR *et al.* [110], artigo publicado e premiado no 34<sup>o</sup> Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, o objetivo único consistiu em minimizar as emissões de  $CO_2$ , tendo como restrições um tempo médio máximo para atendimento e um número limitado de equipamentos. Os resultados indicaram que o modelo foi capaz de fornecer boas soluções para o problema e que, embora geralmente o aumento no número de reboques acarrete em aumento do número de atendimentos, em alguns casos específicos isso pode não acontecer, já que nem sempre a melhor configuração é aquela que atende a um maior número de incidentes, mas sim aquela que emite menos  $CO_2$ .

BALTAR *et al.* [101] propuseram um modelo bi-objetivo em que se explorou o *trade-off* entre a maximização do atendimento aos incidentes de trânsito e a minimização das emissões de  $CO_2$ . Os resultados mostraram que, quando o tempo máximo de resposta é pequeno, a quantidade de reboques deve ser aumentada para garantir que haja um atendimento adequado. Portanto, o nível de serviço que se espera atingir na resposta a incidentes é o que mais influencia os resultados, independentemente do peso associado à minimização das emissões de  $CO_2$ . Já em BALTAR *et al.* [108], foi proposto um modelo que busca minimizar a fila de congestionamento não recorrente e maximizar a quantidade de incidentes atendidos. Em ambos os modelos foram considerados um número de reboques disponíveis e um nível de serviço a ser respeitado no atendimento, representado por um tempo médio de atendimento calculado a partir da Teoria de Filas. Além disso, eles foram aplicados a dados reais de incidentes da Avenida Brasil, disponibilizados pela Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade do Rio de Janeiro (CET-Rio).

A maioria dos problemas reais são de natureza multiobjetivo, e resolvê-los com um único objetivo não costuma fornecer uma solução eficaz (BHATTACHARYA e BANDYOPADHYAY [111]).

Sendo assim, o modelo apresentado no Capítulo 4 é diferente dos já publicados pois busca trazer mais elementos observados na prática. Ele trabalha com tipos de reboques diferentes simultaneamente, dá a possibilidade de realocação ao longo do dia, permite que uma seção da via possa ser atendida por mais de um reboque e considera um valor máximo (orçamento) a ser empregado na operação ao invés de um número de reboques pré-determinado. O modelo proposto é multiobjetivo e alia Teoria de Filas afim de definir um nível de serviço a ser empregado no atendimento a incidentes. Além disso, os objetivos são intimamente ligados ao tripé da

sustentabilidade considerando questões econômicas, ambientais e sociais.

# Capítulo 4

## Modelagem Matemática

O modelo matemático proposto possui três objetivos: maximizar a quantidade de atendimentos, minimizar o custo da operação e as emissões de  $CO_2$ , devido às filas de congestionamento geradas pela ocorrência de incidentes em vias expressas. Para atingir esses objetivos, o modelo busca localizar os veículos de atendimento de maneira mais eficiente, considerando um nível de serviço desejado (um tempo médio para atendimento) e um orçamento máximo.

Como apresentado na Seção 3.4, enquanto no setor privado os principais objetivos são minimizar custos ou maximizar lucros, no setor público também é importante maximizar os benefícios para a sociedade (REVELLE *et al.* [112]). Nesse sentido, o modelo matemático proposto neste trabalho visa auxiliar o setor público no processo de decisão envolvendo a melhor localização dos reboques de forma a reduzir o impactos econômicos, sociais e ambientais gerados pelos incidentes, devido às filas de congestionamento e perda de qualidade de vida da população afetada contribuindo dessa forma com os objetivos da Agenda 2030.

Neste capítulo, primeiramente são apresentadas considerações a cerca da dinâmica de atendimento a incidentes de tráfego, contemplando os cálculos da fila de congestionamento e das emissões de  $CO_2$ . Posteriormente é apresentado o modelo matemático multiobjetivo proposto, com seus conjuntos, índices, parâmetros, variáveis de decisão e restrições.

### 4.1 Considerações do problema

Conforme mencionado nos Capítulos 1 e 3, os congestionamentos diários de trânsito afetam a qualidade de vida dos moradores de uma cidade, devido aos atrasos nas viagens, ao consumo excessivo de combustíveis fósseis e ao aumento da poluição ambiental; e esses congestionamentos podem ser intensificados pelos incidentes de tráfego, que geram interrupções frequentes e irregulares nas vias.

As próximas seções abordam os cálculos da quantidade de veículos impactados por incidentes e das emissões de  $CO_2$  relacionadas.

#### 4.1.1 Cálculo da quantidade de veículos impactados por incidentes

O cálculo da quantidade de veículos impactados por incidentes é baseado no estudo desenvolvido por KOSTER e RIETVELD [113] e utilizado por BARDAL e JORGENSEN [1]. Assim, considere a Figura 4.1, na qual  $t_0$  corresponde ao horário de início do incidente,  $t_1$  ao horário da remoção do mesmo da via,  $t_2$  ao horário em que não se observa mais nenhuma consequência do mesmo,  $h$  é a fila veicular máxima decorrente do incidente e  $HT$  o tempo de atendimento calculado pela diferença entre  $t_1$  e  $t_0$ . Já  $r_g$  é o taxa de crescimento da fila na via, dado pela diferença do fluxo veicular ( $F$ ) e a sua capacidade com incidente ( $CAP_{crash}$ ) e  $r_a$  é a taxa de dissolução da fila que equivale a capacidade da via sem incidente.

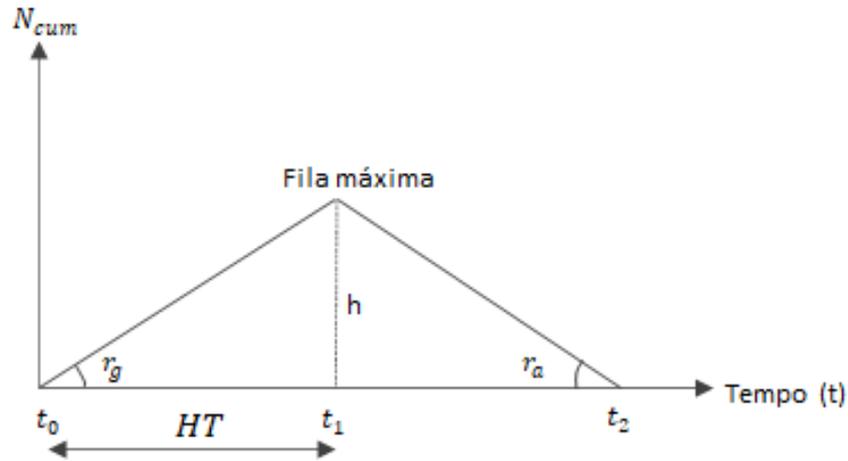


Figura 4.1: Atraso gerado pela ocorrência de um incidente (BARDAL e JORGENSEN [1]).

Duas relações que podem ser retiradas da Figura 4.1 são as Equações (4.1) e (4.2) que demonstram o cálculo do tempo total perdido do incidente ( $TTL$ ) e do tempo médio perdido ( $ATL$ ).

$$TTL = \frac{1}{2} r_g (HT)^2 \left(1 + \frac{r_g}{r_a}\right) \quad (4.1)$$

$$ATL = \frac{1}{2} HT \left(1 - \frac{CAP_{crash}}{F}\right) \quad (4.2)$$

A quantidade de veículos impactados pelo incidente pode ser calculada pela relação entre  $TTL$  e  $ATL$ . Esse resultado é utilizado nos cálculos das emissões de

$CO_2$ , mostrado na Seção 4.1.2. Vale ressaltar que o tamanho da fila gerada pelo congestionamento é calculada para as situações em que o fluxo habitual da via é maior que a capacidade da mesma com o incidente, caso contrário, a existência de filas é desconsiderada. A capacidade da via com incidente foi calculada baseada nas porcentagens propostas na Tabela 3.1.

#### 4.1.2 Cálculo das emissões de dióxido de carbono

Ao considerar a emissão de  $CO_2$  é possível incorporar o impacto ambiental e a situação real do tráfego na análise, uma vez que um alto índice de congestionamento significa altas emissões (BAI *et al.* [3]). A quantidade de veículos afetados por um incidente, as características do tráfego na fila de congestionamento e a redução da velocidade ocasionada, geram diferentes valores de emissão.

Para calcular as emissões de  $CO_2$ , utilizou-se o modelo MEET (HICKMAN [84]) que se baseia em medições reais para estimar as emissões de transporte e consumos de energia para diferentes tipos de veículos levando em consideração a redução da velocidade. Essa relação também é estudada por outros autores como SMIT *et al.* [114] e ABOU-SENNA e RADWAN [86]. Esse método tem uma ampla cobertura de combinações possíveis de tecnologias e combustíveis e considera fatores como tipos de combustível, motores e tipos de veículos (BAI *et al.* [3]).

Diversos estudos envolvendo emissões de poluentes utilizaram o modelo MEET para o cálculos das estimativas de emissões (SHIRI e HUYNH [115], COSTA *et al.* [116], AMER *et al.* [117]). Com o objetivo de determinar rotas verdes, isto é, aquelas que geram menores emissões, COSTA *et al.* [116] e AMER *et al.* [117] utilizaram os coeficientes propostos por HICKMAN [84]. Tratando especificamente da coleta de lixo, ABDELLI *et al.* [118] e CHAIKAEW [119] se basearam nas equações propostas pelo modelo para calcular a variável emissão. Para definir os custos existentes em seu modelo, TANGUY *et al.* [120] calcularam o consumo de combustível de caminhões baseando-se na metodologia de HICKMAN [84], já SHIRI e HUYNH [115] utilizaram o modelo proposto por HICKMAN [84] em 2017 para definir as emissões em uma operação intermodal de contêineres. Recentemente, CHIARA *et al.* [121] utilizaram fórmulas derivadas do modelo MEET para computar as emissões ao dirigir com a finalidade de estudar o estacionamento de veículos comerciais.

O cálculo de emissões  $E(v)$  no modelo MEET é baseado no tipo de veículo em análise e no valor da velocidade ( $v$ ) do cenário em questão, conforme Equação (4.3). Os valores dos parâmetros  $\kappa$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$  variam de acordo com o tipo de veículo em análise e os resultados obtidos são em gramas por quilômetro. Embora o modelo MEET permita o cálculo de diferentes tipos de emissões, optou-se por focar o presente estudo nas emissões de  $CO_2$ , uma vez que o aumento da

concentração deste gás na atmosfera tem conduzido a graves problemas ambientais como o aquecimento global e as alterações climáticas (GROTE *et al.* [5], IPCC [17], JABALI *et al.* [25], DECC [26]).

$$E(v) = \kappa + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad (4.3)$$

Além disso, a partir do estudo de caso da cidade do Rio de Janeiro, verificou-se que a CET-Rio utiliza três tipos de reboques (reboques leves, pesados e super pesados) para atendimento a incidentes que podem ocorrer em diferentes seções de uma via expressa. Sendo assim, considere  $L$ ,  $P$  e  $S$  conjuntos que representam as possíveis seções nas quais podem ser alocados os três diferentes tipos de reboques e  $C$ ,  $O$  e  $T$  conjuntos que representam as diferentes seções que podem ocorrer incidentes envolvendo diferentes tipos veiculares, sendo eles: veículos de passeio ( $C$ ), ônibus e caminhões ( $O$ ), e carretas ( $T$ ).

Observou-se também que cada seção  $c \in C$ ,  $o \in O$  e  $t \in T$ , que solicita atendimento, possui uma frequência de incidentes associada, entretanto, a ocorrência deles varia ao longo do dia, pois podem acontecer no período da manhã, da tarde ou durante a madrugada, desse forma os reboques também podem ser realocados ao longo do dia. Assim, seja  $D$  um conjunto que representa esses três períodos. Outros detalhes sobre essa operação de atendimento são apresentados no Capítulo 5.

Cada seção  $c \in C$ ,  $o \in O$  e  $t \in T$  possui um conjunto de ocorrência de incidentes para cada período  $d \in D$ , sendo eles, respectivamente,  $I_{cd}$ ,  $I_{od}$  e  $I_{td}$ . Considerou-se separadamente a divisão de seções para cada tipo de reboque e tipo de veículo envolvido no incidente, dando mais liberdade aos tomadores de decisão.

Sabendo disso, a emissão considerada foi a diferença entre a resultante da fila de congestionamento gerada pelo incidente e a recorrente do fluxo de tráfego. Portanto, conhecida a quantidade de veículos afetados pelo incidente e a porcentagem de cada tipo na composição do tráfego da via, pode-se calcular as emissões geradas, conforme mostrado a seguir.

A Equação (4.4) apresenta como é obtida a emissão gerada pelos incidentes em uma seção  $c \in C$  atendidos por reboques posicionados na seção  $l \in L$ , no período  $d$ . Porém, esta equação pode ser extrapolada para os incidentes ocorridos na seção  $o \in O$  ou  $t \in T$  atendidos por reboques posicionados na seção  $p \in P$  ou  $t \in T$ , no período  $d \in D$ .

$$E_{cld} = \sum_{i \in I_{cd}} q_{cld}^i \times [\%VeicPass_{cd}^i \times E_{VeicPass_{cd}}^i + \% Onibus_{cd}^i \times E_{Onibus_{cd}}^i + \%Carreta_{cd}^i \times E_{Carreta_{cd}}^i], \quad (4.4)$$

em que:

- $q_{cd}^i$  é a quantidade de veículos impactados pelo congestionamento gerado pela redução de capacidade na seção  $c$  com atendimento sendo realizado por um reboque localizado em  $l$  no período  $d$ ;
- $\%VeicPass_{cd}^i$  é a porcentagem de veículos de passeio em relação à composição total do tráfego encontrado na seção  $c$  durante a ocorrência  $i$  no período  $d$ ;
- $E_{VeicPass_{cd}}^i$  é a emissão de veículos de passeio devido ao incidente  $i$  na seção  $c$  no período  $d$ . Essa emissão é obtida com base na Equação (4.3) a partir da velocidade encontrada na seção com incidente e dos parâmetros para veículos de passeio;
- $\%Onibus_{cd}^i$  é a porcentagem de ônibus em relação à composição total do tráfego encontrado na seção  $c$  durante a ocorrência  $i$  no período  $d$ ;
- $E_{Onibus_{cd}}^i$  é a emissão de ônibus devido ao incidente  $i$  na seção  $c$  no período  $d$ . Essa emissão é obtida com base na Equação (4.3) a partir da velocidade encontrada na seção com incidente e dos parâmetros para ônibus;
- $\%Carreta_{cd}^i$  é a porcentagem de carretas em relação à composição total do tráfego encontrado na seção  $c$  durante a ocorrência  $i$  no período  $d$ ; e
- $E_{Carreta_{cd}}^i$  é a emissão de carretas devido ao incidente  $i$  na seção  $c$  no período  $d$ . Essa emissão é obtida com base na Equação (4.3) a partir da velocidade encontrada na seção com incidente e dos parâmetros para carretas.

As emissões calculadas com o modelo MEET são então utilizadas no modelo de localização proposto na próxima seção.

## 4.2 Modelo de localização proposto

Nesta seção é apresentado o modelo de localização proposto na presente pesquisa que foi baseado na operação de atendimento a incidentes da cidade do Rio de Janeiro. A Tabela 4.1 apresenta todos os conjuntos que dão suporte ao modelo matemático. Por facilitar a leitura, os conjuntos definidos na seção anterior são novamente apresentados.

O cálculo do tempo de resposta depende da localização do reboque e do incidente, visto que ele considera a soma do tempo de viagem entre as seções e o tempo de liberação da ocorrência. Por exemplo, quando um incidente  $i \in I_{cd}$  ocorre na

Tabela 4.1: Conjuntos presentes no modelo matemático proposto.

Notação	Descrição do conjunto
$C$	Seções da via com ocorrência de incidentes envolvendo veículos de passeio.
$L$	Possíveis seções onde pode ser localizados os reboques leves.
$O$	Seções da via com ocorrência de incidentes envolvendo ônibus e caminhões.
$P$	Possíveis seções onde podem ser localizados os reboques pesados.
$T$	Seções da via com ocorrência de incidentes envolvendo carretas.
$S$	Possíveis seções onde podem ser localizados os reboques superpesados.
$D$	Períodos do dia utilizados no modelo (período da manhã, da tarde e durante a madrugada).

seção  $c \in C$  é atendido por um reboque localizado na seção  $l \in L$  em um determinado período  $d \in D$ , o seu tempo de resposta é representado por  $t_{cld}^i$ , e envolve o deslocamento entre  $c$  e  $l$ , bem como o tempo empregado no socorro.

Os incidentes ocorrem de forma estocástica e os processos de resposta a estes eventos apresentam o mesmo comportamento (OZBAY *et al.* [23]). O tempo decorrido entre um incidente e outro pode ser representado por uma distribuição de probabilidade como indicado pelos estudos de SOBREIRA e CUNTO [122] e KARAGANIS e MIMIS [123]. Sendo assim, o processo de atendimento pode ser representado pelos modelos  $M/M/1$  e  $M/M/C$  da Teoria de Filas (FOGLIATTI e MATTOS [41]). Nesses modelos, os intervalos de tempo entre os incidentes e entre atendimentos podem ser representados por distribuições de probabilidade exponenciais.

O modelo  $M/M/1$  da Teoria de Filas (FOGLIATTI e MATTOS [41]) foi utilizado para estimar o tempo médio no sistema dos incidentes a partir do cálculo do tempo médio de espera no sistema ( $\tau$ ), conforme Equação (4.5), onde  $\lambda$  representa a taxa de ocorrência e  $\mu$  a taxa de atendimento.

$$\tau = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (4.5)$$

Dessa forma foi possível relacionar a taxa média de incidentes por trecho com as taxas médias de serviço (que dependem de onde o reboque está localizado) e o tempo médio de duração dos incidentes, encontrando assim um nível de serviço esperado para o atendimento a partir da definição do tempo médio de duração dos incidentes ( $\tau$ ) considerado aceitável.

Assim, seja  $\lambda_{cd}$  a taxa média de ocorrência de incidentes com veículos leves associada à seção  $c \in C$  no período  $d \in D$  e  $\mu_{cld} = \frac{1}{|I_{cd}|} \sum_{i \in I_{cd}} \frac{1}{t_{cld}^i}$  a taxa média de atendimento de incidentes localizados na seção  $c \in C$  quando servido pelo reboque leve localizado na seção  $l \in L$  no período  $d \in D$ . Com isso, pode-se calcular o

tempo médio de duração dos incidentes por meio da Teoria de Filas e comparar a um valor aceitável  $\tau$ . A Figura 4.2 exemplifica o processo de socorro de um reboque a incidentes e destaca as taxas médias de atendimento relacionadas.

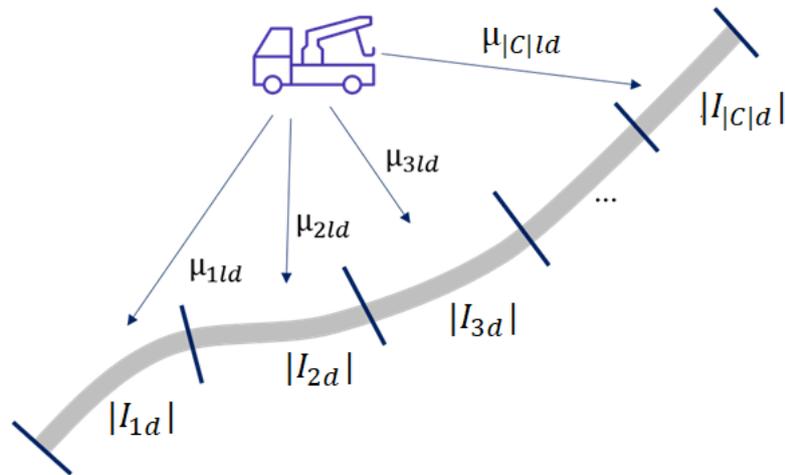


Figura 4.2: Esquema demonstrando o atendimento realizado por um reboque leve  $l$  a incidentes envolvendo veículos de passeio na seção  $c$ .

Essas relações, aplicadas a veículos de passeio atendidos por reboques leves, devem ser estendidas aos incidentes ocorridos envolvendo ônibus e caminhões atendidos por reboques pesados, e aos incidentes com carretas servidos por reboques superpesados.

Assim, o modelo proposto considera o aumento da emissão de  $CO_2$  gerada pelos incidentes, visto que as ocorrências normalmente levam a filas de congestionamento devido à redução da capacidade e à mudança de comportamento do motorista (TRB [45]), conforme destacado na Seção 4.1.2.

Além de maximizar incidentes atendidos e reduzir as emissões de  $CO_2$ , o modelo proposto também busca minimizar o custo com a operação, respeitando um valor máximo (orçamento) predefinido. Cada tipo de reboque possui um custo fixo por mês. Esses veículos são conduzidos por motoristas que recebem salários por hora de serviço prestado. Sendo assim, seja  $ORC$  o orçamento máximo disponível.

Para garantir um atendimento mínimo e por questões reais da operação, que envolvem a prefeitura, faz-se necessário alocar ao menos um reboque de cada tipo em cada período do dia. Além disso, a mesma quantidade de reboques alocada no período da manhã deve ser empregada no período da tarde para garantir um bom atendimento nos horários de pico da manhã e da tarde.

Na prática, caso o reboque não esteja disponível, é importante definir se outros reboques podem atender aquela determinada seção, mantendo o tempo médio de atendimento proposto mesmo não sendo a localização que trará menor emissão. Para isso, considerou-se que cada seção pode ser atendida por no máximo  $reb$  reboques,

dessa forma é possível prever uma contingência para algumas seções mantendo o nível de serviço proposto anteriormente.

#### 4.2.1 Parâmetros e variáveis envolvidas no modelo

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam, de maneira resumida, os parâmetros de entrada e as variáveis de decisão do modelo matemático proposto.

As variáveis  $x_{cld}$ ,  $x_{opd}$ ,  $x_{tsd}$ ,  $h_{cld}$ ,  $h_{opd}$  e  $h_{tsd}$  embora similares, respectivamente, são utilizadas em situações distintas. A variável  $x_{cld}$ , por exemplo, indica quais seções  $l \in L$  podem atender aos incidentes da seção  $c \in C$  mantendo o mesmo nível serviço, já a variável  $h_{cld}$  está associada à localização do reboque leve  $l \in L$  que gera menor emissão devido a fila de congestionamento. Esse mesmo raciocínio deve ser aplicado para as variáveis relacionadas a ônibus e caminhões, e a carretas.

Tabela 4.2: Parâmetros de entrada do modelo matemático proposto.

Notação	Descrição
$I_{cd}$	Conjunto de incidentes ocorridos na seção $c \in C$ no período $d \in D$
$I_{od}$	Conjunto de incidentes ocorridos na seção $o \in O$ no período $d \in D$
$I_{td}$	Conjunto de incidentes ocorridos na seção $t \in T$ no período $d \in D$
$E_{cld}$	Valor da emissão devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes com veículos leves ocorridos na seção $c \in C$ atendidos pelo reboque leve $l \in L$ no período $d \in D$
$E_{opd}$	Valor da emissão devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes com ônibus e carreta ocorridos na seção $o \in O$ atendidos pelo reboque pesado $p \in P$ no período $d \in D$
$E_{tsd}$	Valor da emissão devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes com carretas ocorridos na seção $t \in T$ atendidos pelo reboque superpesado $s \in S$ no período $d \in D$
$E_{max_{cd}}$	Valor máximo da emissão devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes ocorridos na seção $c \in C$ no período $d \in D$
$E_{max_{od}}$	Valor máximo da emissão devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes ocorridos na seção $o \in O$ no período $d \in D$
$E_{max_{td}}$	Valor máximo da emissão devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes ocorridos na seção $t \in T$ no período $d \in D$
$ORC$	Valor máximo disponível para ser gasto na operação de reboques (orçamento máximo)
$F_l$	Valor mensal do reboque leve localizado na seção $l \in L$
$F_p$	Valor mensal do reboque pesado localizado na seção $p \in P$
$F_s$	Valor mensal do reboque superpesado localizado na seção $s \in S$
$SAL$	Valor do salário do motorista do reboque
$\mu_{cld}$	Taxa média de atendimento dos incidentes ocorridos com veículos leves na seção $c \in C$ atendidos pelo reboque leve localizado na seção $l \in L$ no período $d \in D$
$\mu_{opd}$	Taxa média de atendimento dos incidentes com ônibus e caminhão ocorridos na seção $o \in O$ atendidos pelo reboque pesado localizado na seção $p \in P$ no período $d \in D$
$\mu_{tsd}$	Taxa média de atendimento dos incidentes com carretas ocorridos na seção $t \in T$ atendidos pelo reboque superpesado localizado na seção $s \in S$ no período $d \in D$
$\tau$	Tempo médio considerado para atendimento
$reb$	Quantidade máxima de reboques que podem atender aos incidentes
$\lambda_{cd}$	Taxa média de incidentes ocorridos com veículos leves na seção $c \in C$ no período $d \in D$
$\lambda_{od}$	Taxa média de incidentes com ônibus e caminhões ocorridos na seção $o \in O$ no período $d \in D$
$\lambda_{td}$	Taxa média de incidentes ocorridos com carretas na seção $t \in T$ no período $d \in D$

Tabela 4.3: Variáveis de decisão do modelo matemático proposto.

Notação	Descrição
$x_{cld}$	Variável de decisão binária que indica se os incidentes com veículos leves ocorridos na seção $c \in C$ são atendidos pelo reboque leve localizado na seção $l \in L$ no período $d \in D$ ( $x_{cld} = 1$ ) ou não ( $x_{cld} = 0$ )
$x_{opd}$	Variável de decisão binária que indica se os incidentes com ônibus e caminhões ocorridos na seção $o \in O$ são atendidos pelo reboque pesado localizado na seção $p \in P$ no período $d \in D$ ( $x_{opd} = 1$ ) ou não ( $x_{opd} = 0$ )
$x_{tsd}$	Variável de decisão binária que indica se os incidentes carretas ocorridos na seção $t \in T$ são atendidos pelo reboque superpesado localizado na seção $s \in S$ no período $d \in D$ ( $x_{tsd} = 1$ ) ou não ( $x_{tsd} = 0$ )
$h_{cld}$	Variável de decisão binária que indica se os incidentes ocorridos na seção $c \in C$ são atendidos pelo reboque localizado na seção $l \in L$ no período $d \in D$ ( $h_{cld} = 1$ ) ou não ( $h_{cld} = 0$ ), caso mais de um reboque possa atender a seção
$h_{opd}$	Variável de decisão binária que indica se os incidentes ocorridos na seção $o \in O$ são atendidos pelo reboque localizado na seção $p \in P$ no período $d \in D$ ( $h_{opd} = 1$ ) ou não ( $h_{opd} = 0$ ), caso mais de um reboque possa atender a seção
$h_{tsd}$	Variável de decisão binária que indica se os incidentes ocorridos na seção $t \in T$ são atendidos pelo reboque localizado na seção $s \in S$ no período $d \in D$ ( $h_{tsd} = 1$ ) ou não ( $h_{tsd} = 0$ ), caso mais de um reboque possa atender a seção
$y_{ld}$	Variável de decisão binária que indica se um reboque leve está alocado à seção $l \in L$ no período $d \in D$ ( $y_{ld} = 1$ ) ou não ( $y_{ld} = 0$ )
$y_{pd}$	Variável de decisão binária que indica se um reboque pesado está alocado à seção $p \in P$ no período $d \in D$ ( $y_{pd} = 1$ ) ou não ( $y_{pd} = 0$ )
$y_{sd}$	Variável de decisão binária que indica se um reboque superpesado está alocado à seção $s \in S$ no período $d \in D$ ( $y_{sd} = 1$ ) ou não ( $y_{sd} = 0$ )

## 4.2.2 Funções Objetivo

O problema de localização de reboques proposto possui três Funções Objetivo. A primeira delas, a Função Objetivo (4.6), busca minimizar a emissão de  $CO_2$  devido à fila de congestionamento gerada pelos incidentes atendidos e pelos incidentes não atendidos. Para considerar a emissão dos incidentes não atendidos, que geram filas de congestionamento de tamanho desconhecido, foi utilizado, como parâmetro de emissão, o maior valor entre todos os calculados para cada seção da via. Com isso,  $E_{max_{cd}}$ ,  $E_{max_{od}}$  e  $E_{max_{td}}$  são os maiores valores de emissão observado entre os incidentes ocorridos nas seções  $c \in C$ ,  $o \in O$  e  $t \in T$ , respectivamente, no período  $d \in D$ .

$$\begin{aligned}
\text{Minimize} \quad & \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} E_{cld} h_{cld} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} E_{opd} h_{opd} + \\
& \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} E_{tsd} h_{tsd} + \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} E_{\max_{cd}} (1 - \sum_{l \in L} h_{cld}) + \\
& \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} E_{\max_{od}} (1 - \sum_{p \in P} h_{opd}) + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} E_{\max_{td}} (1 - \sum_{t \in T} h_{tsd})
\end{aligned} \tag{4.6}$$

A segunda Função Objetivo (4.7) minimiza o valor gasto com a operação dos reboques. O primeiro termo refere-se ao custo mensal referente aos veículos de atendimento e o segundo ao valor dos salários das equipes que deve ser pago por turno de trabalho. A divisão do valor das equipes por turno foi uma solicitação da CET-Rio.

Como os reboques utilizados no período da manhã ( $d = 1$ ) devem atuar a tarde ( $d = 2$ ) e o total de reboques disponíveis no período da madrugada ( $d = 3$ ) deve ser no máximo o total empregado na operação durante a manhã (veja Restrições (4.23) e (4.26)), o custo mensal dos reboques pode ser calculado considerando apenas o período da manhã, como definido no primeiro termo da Função Objetivo (4.7).

$$\begin{aligned}
\text{Minimize} \quad & (F_l \sum_{l \in L} y_{l1} + F_p \sum_{p \in P} y_{p1} + F_s \sum_{s \in S} y_{s1}) + \\
& SAL(\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} y_{ld} + \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} y_{pd} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} y_{sd})
\end{aligned} \tag{4.7}$$

A terceira Função Objetivo busca maximizar o número de ocorrências atendidas. Considerando então as variáveis de decisão utilizadas no modelo matemático, nota-se que esse objetivo pode ser atendido de duas maneiras diferentes, conforme Funções Objetivo (4.8) e (4.9). Portanto, deve-se utilizar a Função Objetivo (4.8) ou a (4.9).

A Função Objetivo (4.8) garante que se uma seção é atendida, suas ocorrências são consideradas uma única vez. Já a Função Objetivo (4.9) leva em consideração a possibilidade de uma seção ser atendida por mais de um reboque, o que é possível segundo as Restrições (4.13) e (4.16). Essa característica é explorada no Capítulo 5 para mostrar o impacto dessas duas Funções Objetivo no processo de localização.

$$\begin{aligned}
\text{Maximize} \quad & \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} |I_{cd}| h_{cld} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} |I_{od}| h_{opd} + \\
& \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} |I_{td}| h_{tsd}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

ou

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} |I_{cd}| x_{cld} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} |I_{od}| x_{opd} + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} |I_{td}| x_{tsd} \end{aligned} \quad (4.9)$$

### 4.2.3 Restrições do modelo proposto

As Funções Objetivos definidas anteriormente estão sujeitas às restrições apresentadas a seguir.

$$\sum_{l \in L} h_{cld} \leq 1, \quad \forall c \in C, d \in D \quad (4.10)$$

$$\sum_{p \in P} h_{opd} \leq 1, \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.11)$$

$$\sum_{s \in S} h_{tsd} \leq 1, \quad \forall t \in T, d \in D \quad (4.12)$$

$$\sum_{l \in L} x_{cld} \leq reb, \quad \forall c \in C, d \in D \quad (4.13)$$

$$\sum_{p \in P} x_{opd} \leq reb, \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.14)$$

$$\sum_{s \in S} x_{tsd} \leq reb, \quad \forall t \in T, d \in D \quad (4.15)$$

$$h_{cld} \leq x_{cld}, \quad \forall c \in C, l \in L, d \in D \quad (4.16)$$

$$h_{opd} \leq x_{opd}, \quad \forall o \in O, p \in P, d \in D \quad (4.17)$$

$$h_{tsd} \leq x_{tsd}, \quad \forall t \in T, s \in S, d \in D \quad (4.18)$$

$$reb \sum_{l \in L} h_{cld} \geq \sum_{l \in L} x_{cld}, \quad \forall c \in C, d \in D \quad (4.19)$$

$$reb \sum_{p \in P} h_{opd} \geq \sum_{p \in P} x_{opd}, \quad \forall o \in O, d \in D \quad (4.20)$$

$$reb \sum_{s \in S} h_{tsd} \geq \sum_{s \in S} x_{tsd}, \quad \forall t \in T, d \in D \quad (4.21)$$

$$F_l \sum_{l \in L} y_{l1} + F_p \sum_{p \in P} y_{p1} + F_s \sum_{s \in S} y_{s1} + SAL(\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} y_{ld} + \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} y_{pd} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} y_{sd}) \leq ORC \quad (4.22)$$

$$\sum_{l \in L} y_{l1} = \sum_{l \in L} y_{l2} \quad (4.23)$$

$$\sum_{p \in P} y_{p1} = \sum_{p \in P} y_{p2} \quad (4.24)$$

$$\sum_{s \in S} y_{s1} = \sum_{s \in S} y_{s2} \quad (4.25)$$

$$\sum_{l \in L} y_{l1} \geq \sum_{l \in L} y_{l3} \quad (4.26)$$

$$\sum_{p \in P} y_{p1} \geq \sum_{p \in P} y_{p3} \quad (4.27)$$

$$\sum_{s \in S} y_{s1} \geq \sum_{s \in S} y_{s3} \quad (4.28)$$

$$\sum_{l \in L} y_{ld} \geq 1, \forall d \in D \quad (4.29)$$

$$\sum_{p \in P} y_{pd} \geq 1, \forall d \in D \quad (4.30)$$

$$\sum_{s \in S} y_{sd} \geq 1, \forall d \in D \quad (4.31)$$

$$x_{cld} \leq y_{ld}, \quad \forall c \in C, l \in L, d \in D \quad (4.32)$$

$$x_{opd} \leq y_{pd}, \quad \forall o \in O, p \in P, d \in D \quad (4.33)$$

$$x_{tsd} \leq y_{sd}, \quad \forall t \in T, s \in S, d \in D \quad (4.34)$$

$$\sum_{c \in C} \mu_{cld} x_{cld} \geq \sum_{c \in C} \frac{x_{cld}}{\tau} + \sum_{c \in C} (\lambda_{cd} x_{cld}), \quad \forall l \in L, d \in D \quad (4.35)$$

$$\sum_{o \in O} \mu_{opd} x_{opd} \geq \sum_{o \in O} \frac{x_{opd}}{\tau} + \sum_{o \in O} (\lambda_{od} x_{opd}), \quad \forall p \in P, d \in D \quad (4.36)$$

$$\sum_{t \in T} \mu_{tsd} x_{tsd} \geq \sum_{t \in T} \frac{x_{tsd}}{\tau} + \sum_{t \in T} (\lambda_{td} x_{tsd}), \quad \forall s \in S, d \in D \quad (4.37)$$

$$x_{cld} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, l \in L, d \in D \quad (4.38)$$

$$x_{opd} \in \{0, 1\}, \quad \forall o \in O, p \in P, d \in D \quad (4.39)$$

$$x_{tsd} \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T, s \in S, d \in D \quad (4.40)$$

$$h_{cld} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, l \in L, d \in D \quad (4.41)$$

$$h_{opd} \in \{0, 1\}, \quad \forall o \in O, p \in P, d \in D \quad (4.42)$$

$$h_{tsd} \in \{0, 1\}, \quad \forall t \in T, s \in S, d \in D \quad (4.43)$$

$$y_{ld} \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in L, d \in D \quad (4.44)$$

$$y_{pd} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, d \in D \quad (4.45)$$

$$y_{sd} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, d \in D \quad (4.46)$$

As Restrições (4.10)-(4.12) garantem que cada seção poderá ser atendida. As Restrições (4.13)-(4.15) garantem que cada seção é atendida por no máximo a quantidade de reboques definida inicialmente. As Restrições (4.16)-(4.21) são responsáveis por garantir a relação entre as variáveis  $x_{cld}$ ,  $x_{opd}$ ,  $x_{tsd}$ ,  $h_{cld}$ ,  $h_{opd}$  e  $h_{tsd}$ .

A Restrição (4.22) garante que o valor máximo disponível para operação de reboques, considerando o custo do reboque e do motorista, não seja ultrapassado. Observe que está restrição leva em conta o valor total gasto com os reboques no período da manhã acrescido do total gasto com motoristas em qualquer período do dia. Garante-se assim que no período da manhã, o valor total da operação não deve ser superior ao valor máximo disponível.

As Restrições (4.23)-(4.25) garantem que os reboques utilizados no período da manhã ( $d = 1$ ) serão empregados no período da tarde ( $d = 2$ ), podendo apenas serem alocados em seções diferentes. Note que, como a operação da tarde utiliza a mesma quantidade de reboques do período da manhã, o seu custo é igual ao do período da manhã, logo respeita o orçamento máximo disponível (Restrição (4.22)).

As Restrições (4.26)-(4.28) garantem que a quantidade de reboques utilizados no período da madrugada seja menor ou igual aos empregados no período da manhã e da tarde, podendo apenas serem alocados em seções diferentes.

As Restrições (4.29)-(4.31) garantem que exista pelo menos um reboque de cada tipo disponível durante todo o dia. As Restrições (4.32)-(4.34) garantem que um incidente ocorrido na seção  $c \in C$ ,  $o \in O$  ou  $t \in T$ , no período  $d \in D$ , só será atendido por um reboque localizado na seção  $l \in L$ ,  $p \in P$  ou  $s \in S$ , se e somente se, esse reboque for de fato alocado na seção  $l$ ,  $p$  ou  $s$ , respectivamente, no período  $d$ .

As Restrições (4.35)-(4.37) garantem que o tempo médio para atendimento aos incidentes será respeitado a partir de uma medida de desempenho apresentada na

Teoria das Filas. Finalmente, as Restrições (4.38)-(4.46) definem o domínio das variáveis de decisão.

Como mencionado no Capítulo 1, é importante notar que existe um *trade-off* entre as funções objetivo, pois a melhoria de uma pode resultar em piora da outra, o que é característico de modelos multiobjetivo. Neste caso, o *trade-off* que se busca equilibrar está relacionado à quantidade de incidentes atendidos, à emissão de  $CO_2$  e ao custo da operação. De fato, quando se busca maximizar a quantidade de incidentes atendidos, o custo aumenta, mas nem sempre a emissão de  $CO_2$  é minimizada, pois não é sempre que a seção com maior número de incidentes é aquela com maior fila de congestionamento e, conseqüentemente, maior emissão de  $CO_2$ . Já quando se busca minimizar o custo da operação, o número de incidentes atendidos reduz, e, conseqüentemente, a emissão de  $CO_2$  aumenta. Além disso, não é necessariamente a seção com o maior número de ocorrências aquela que gera maiores emissões. As emissões estão ligadas à fila de congestionamento geradas pelo incidente, já o maior número de atendimentos pode acontecer ao atender mais incidentes em locais com menor fluxo e maior velocidade. Portanto, quando o modelo tem como enfoque o maior número de atendimento, os reboques não ficam necessariamente localizados nos locais que geram maiores taxas de emissão. Em problemas desse tipo, a dominância de Pareto pode ser aplicada para encontrar o conjunto de soluções eficientes ao se considerar os três objetivos simultaneamente.

# Capítulo 5

## Estudo de caso

A cidade do Rio de Janeiro tem características geográficas marcantes que influenciam diretamente no comportamento do tráfego e nos tempos de viagens. No centro da cidade, encontra-se a Floresta da Tijuca, com uma extensão de 3.953 ha de Mata Atlântica, que a torna a maior floresta urbana do mundo replantada pelo homem (ICMBIO [124]). O centro comercial fica deslocado para o leste e é banhado pela Baía da Guanabara por um lado e do outro ele é isolado pela Floresta da Tijuca, o que torna seu acesso mais restrito, observe Figura 5.1. A soma de todas essas questões agrava as consequências dos incidentes de tráfego de uma das cidades mais congestionadas do mundo, segundo TOMTOM [125].

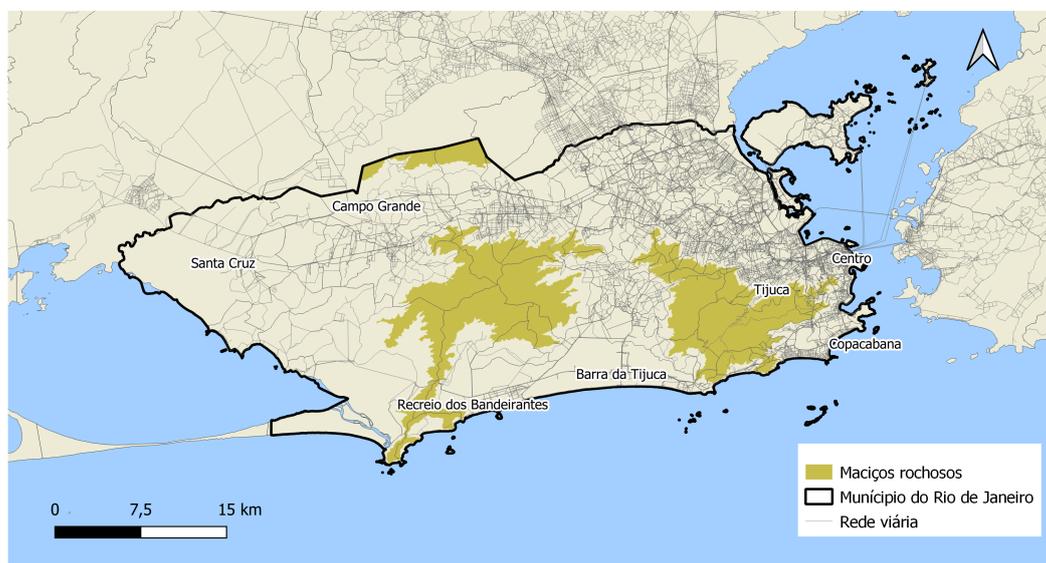


Figura 5.1: Mapa da cidade do Rio de Janeiro.

Além disso, as redes de alta capacidade e as vias principais são radiais em direção à Capital, o que impacta o padrão de ocupação da região (PDTU 2014 [126]). De fato, os bairros da cidade são interligados por vias expressas e arteriais e há poucas alternativas de rotas. A demanda por transporte é pendular e concentrada em picos,

o que gera sobreuso em algumas horas e subutilização em contrafluxo e entre picos (PDTU 2014 [126]).

Ao observar a distribuição de população a partir dos dados de IBGE [127], as maiores densidades demográficas do Rio de Janeiro se encontram na Zona Norte e em parte da Zona Sul, como é possível ver na Figura 5.2.

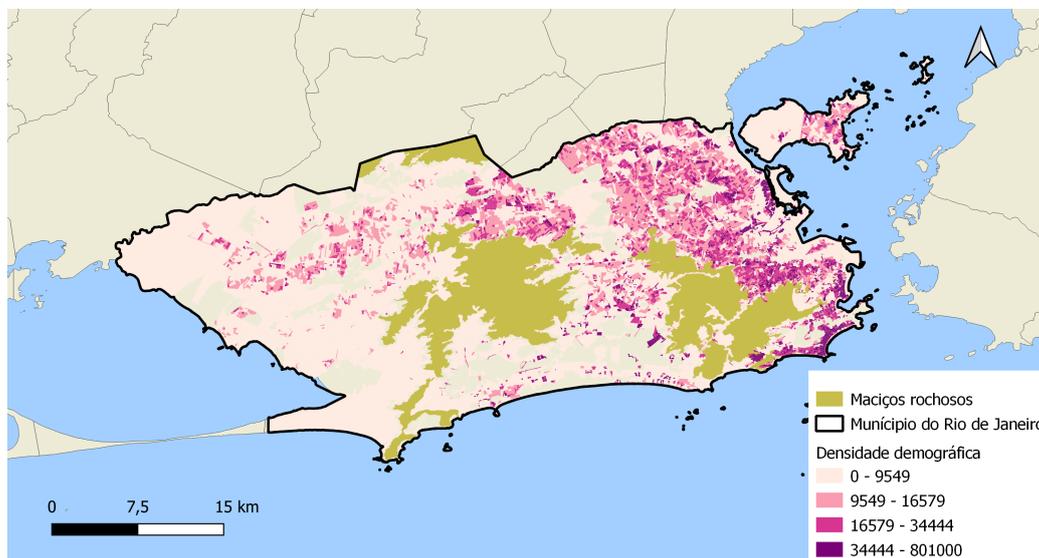


Figura 5.2: Mapa da cidade do Rio de Janeiro com as densidades demográficas.

Já para comparar as realidades microurbanas da cidade com uma visão mais social, a Prefeitura do Rio de Janeiro utiliza o Índice de Desenvolvimento Social (IDS). Esse índice é baseado nos dados do Censo Demográfico de 2010 do IBGE e considera o abastecimento de água adequado, a coleta de esgoto adequada, lixo coletado diretamente por serviço de limpeza ou colocado em caçambas de serviço de limpeza, número médio de banheiros por morador, analfabetismo de moradores de 10 a 14 anos e rendimento médio do responsável pelo domicílio em salários mínimos, conforme IPP [128]. É possível observar na Figura 5.3 que a Zona Sul, Tijuca, Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes são as regiões com maiores IDS, já as regiões mais a oeste (Campo Grande e Santa Cruz) possuem os menores índices.

Hoje, a cidade sofre com o tráfego intenso de veículos em suas vias de grande capacidade, principalmente nos horários de pico, somado ao grande número de incidentes que impacta diretamente a mobilidade urbana diária. Esses incidentes interferem diretamente no tempo de viagem de todos os viajantes, aumentam o congestionamento das vias e a emissão de  $CO_2$ . Atualmente, eles são atendidos por veículos (normalmente reboques) da CET-Rio, órgão responsável pelo planejamento, coordenação e controle do fluxo de pedestres e veículos na cidade do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que a operação é de responsabilidade da CET-Rio, porém é realizada através de contratos terceirizados.

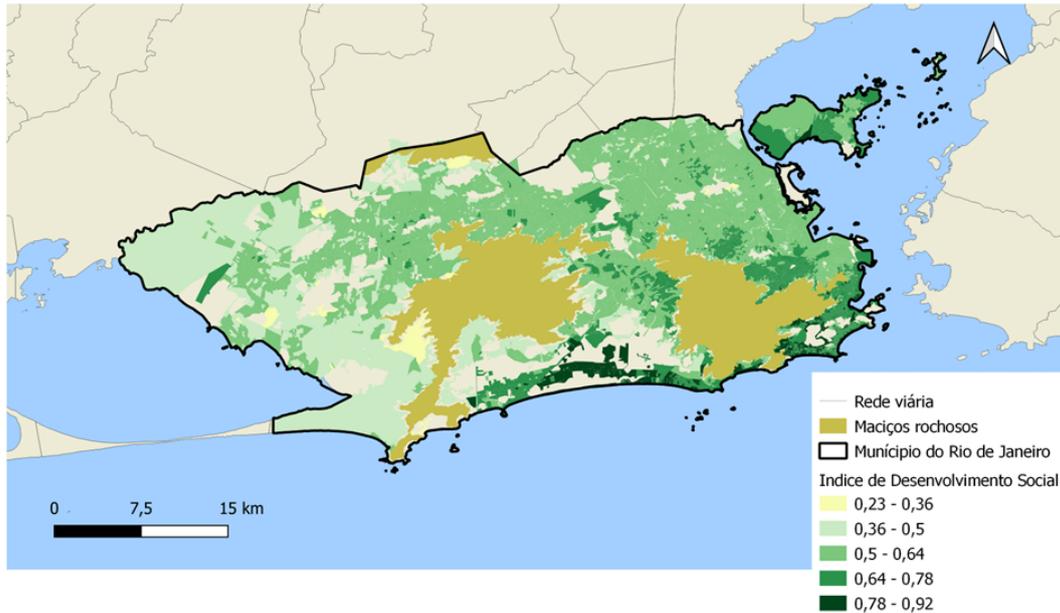


Figura 5.3: Mapa da cidade do Rio de Janeiro com os Índices de Desenvolvimento Social.

No momento, a detecção de incidentes é feita de três formas: câmeras de monitoramento, patrulhamento (motocicletas) e por meio de um número de telefone disponibilizado à população. Após a detecção do incidente, um veículo de atendimento é enviado para retirada do veículo da pista. Pode ser um reboque, uma caminhonete ou a própria motocicleta que faz o patrulhamento, depende do tipo de incidente e do veículo envolvido. Por exemplo, carretas só podem ser atendidas por reboque superpesado, mas veículos de passeio podem ser empurrados por uma caminhonete.

Existem três tipos de reboques: (a) reboques leves, que atendem veículos de passeio e utilitários; (b) reboque pesado, que atendem caminhões e ônibus; e (c) reboque superpesado, que atendem carretas, conforme Figura 5.4.

Dentre as vias que são monitoradas pela CET-Rio, optou-se por estudar a Avenida Brasil e a Linha Vermelha, dois importantes eixos de ligação entre o Centro, a região metropolitana, o subúrbio e a Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro e as duas vias com maior número de atendimentos registrados, veja Figura 5.5. De acordo com a contagem de veículos realizada pela CET-Rio (2017), essas vias, juntamente com o Túnel Rebouças, apresentam o maior fluxo de tráfego da cidade, variando entre 70 e 110 mil veículos por sentido em dias úteis. A Avenida Brasil possui, em ambos os sentidos, uma pista central com quatro faixas de rolamento, sendo uma exclusiva para ônibus e uma pista lateral com três faixas de rolamento. Já a Linha Vermelha possui três faixas de rolamento, baixo volume de ônibus e a circulação de veículos de carga nessa via é proibida.

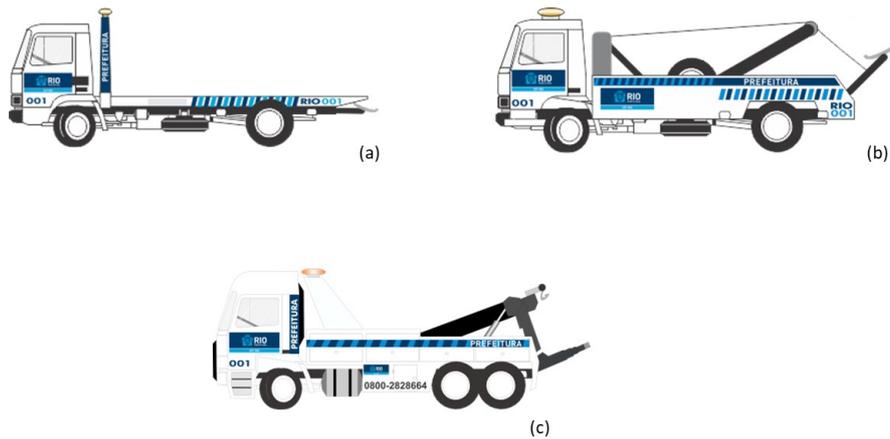


Figura 5.4: Tipos de reboques.

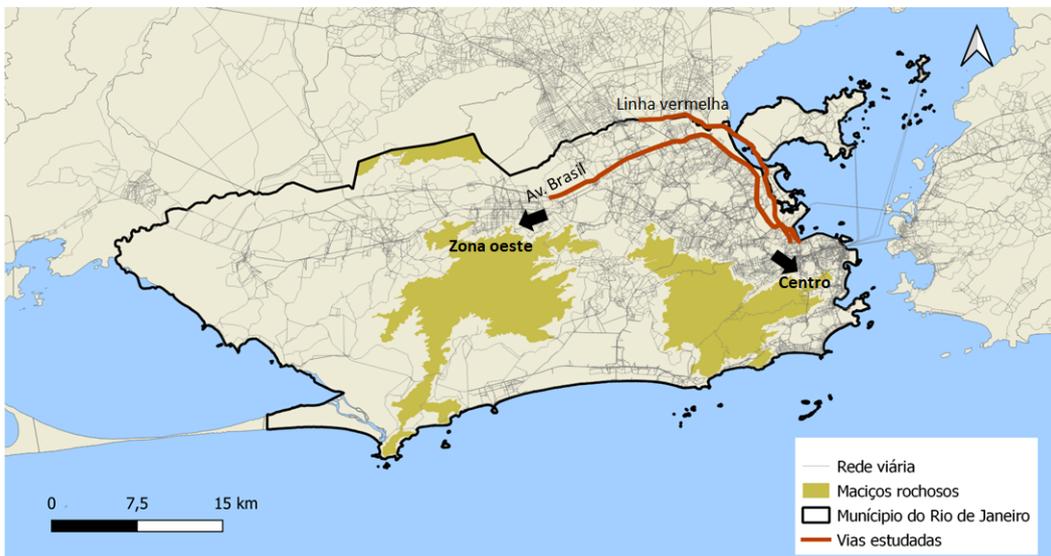


Figura 5.5: Mapa com as vias estudadas: Avenida Brasil e Linha Vermelha.

No banco de dados disponibilizado há registro de 22.772 incidentes ocorridos em 2018, porém no presente estudo foram considerados apenas os incidentes atendidos pelos reboques leves, pesados e superpesados que correspondem a 11.054 registros. Os outros incidentes foram atendidos pelas motocicletas ou caminhonetes que fazem ronda nas vias de estudo.

Quanto à distribuição dos atendimentos entre os reboques, destaca-se que 84,1% dos incidentes foram atendidos por reboques leves, 8,8% por reboques pesados e 7,1% pelos reboques superpesados. A grande presença de atendimento dos reboques leves já era esperada devido ao grande número de veículos de passeio nas vias estudadas. Além disso, as ocorrências dos incidentes por tipo de reboque se distribuem de forma diferente ao longo da via, como é possível observar na Figura 5.6, na qual as cores mais “quentes” correspondem às maiores concentrações de incidentes. As

concentrações de incidentes apresentadas na Figura 5.6 consideram a divisão por seções feita na via para aplicação do modelo matemático.

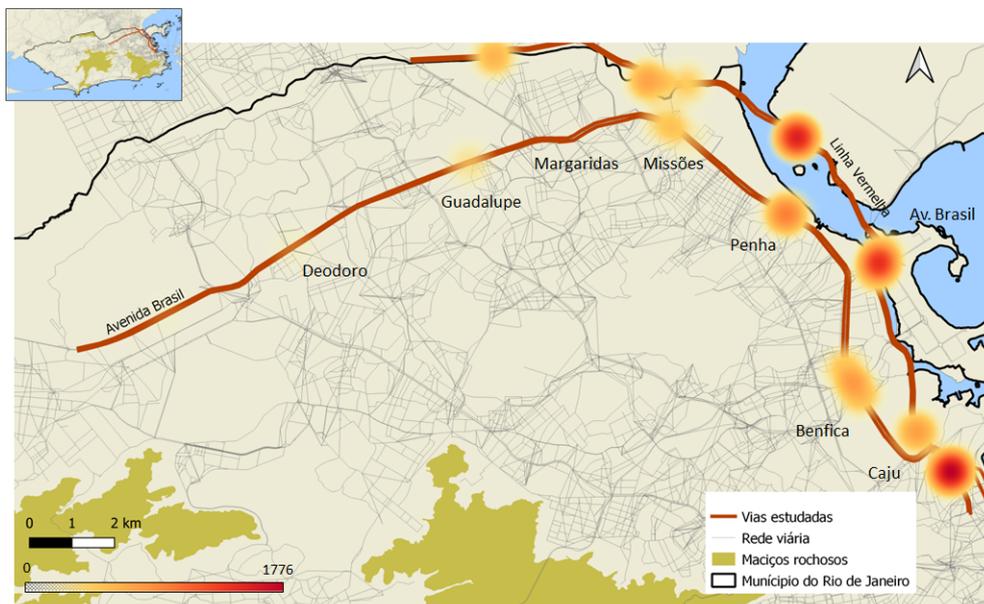


Figura 5.6: Mapa de calor com os incidentes atendidos por reboques em 2018.

Observa-se que quanto mais próximo do Centro da cidade, maior a quantidade de ocorrências. Ressalta-se que, na Avenida Brasil, enquanto os atendimentos dos reboques leves ocorrem principalmente entre Caju e Penha, os reboques superpesados realizam atendimentos principalmente entre Penha e Margaridas. Além disso, o tempo médio de retirada do incidente é diferente dependendo do tipo de reboque envolvido. Enquanto os reboques leves realizam o atendimento em 15 minutos, os reboques pesados demoram cerca de 28 minutos e os superpesados 36.

Quanto à natureza dos incidentes, a maioria dos atendimentos são referentes a enguiços mecânicos (77,2%), seguido dos sinistros (12,5%) e de pneu furado (8,9%), conforme pode-se observar na Figura 5.7. Se somados, os enguiços mecânicos, pneu furado, abandono de veículo e falta de combustível representam 87,08% do total de atendimentos. Ressalta-se ainda que esses incidentes normalmente bloqueiam apenas uma faixa de rolamento da via.

Uma análise temporal dos atendimentos é apresentada na Tabela 5.1. Observa-se que os dias úteis são os que possuem mais atendimentos. Já sexta-feira é o dia da semana com maior número de atendimentos (16,12%) e terça-feira é o dia útil com menor quantidade de ocorrências (14,1%), ficando próximo do que acontece aos sábados (13,21%). No domingo foram registrados 10,24% das ocorrências.

Quanto aos meses do ano, não foi observada uma grande diferença entre eles. O mês de fevereiro foi o que apresentou menor quantidade de atendimentos (7,5%), porém vale ressaltar que, além de possuir um menor número de dias, tem muitos

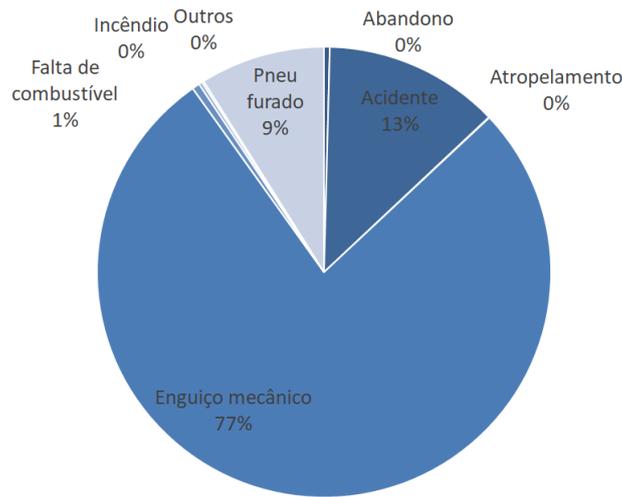


Figura 5.7: Tipos de incidentes atendidos em 2018.

feriados, inclusive o carnaval. Observa-se também uma redução na quantidade de atendimentos em maio (7,53%), porém entre 21 e 30 de maio de 2018 houve uma greve nacional dos caminhoneiros que reduziu consideravelmente o fluxo de veículos nas vias, visto que a cidade do Rio de Janeiro ficou sem combustível (VEJA [129]). O mês que obteve maior quantidade de atendimentos foi março, com 9,54% do total.

Quanto aos horários, 88,73% das ocorrências são entre 6h e 19h, sendo que 7h, 8h, 9h e 18h são os horários com os maiores números de atendimentos. Pode-se observar ainda uma pequena queda na quantidade de atendimentos entre 11h e 14h, e que a quantidade de ocorrências reduz consideravelmente entre 21h e 5h.

Tabela 5.1: Análise temporal dos incidentes.

<b>Mês do ano</b>	<b>Quantidade</b>	<b>%</b>	<b>Horário de início</b>	<b>Quantidade</b>	<b>%</b>
Janeiro	935	8,46	0	50	0,45
Fevereiro	829	7,50	1	21	0,19
Março	1055	9,54	2	19	0,17
Abril	907	8,21	3	25	0,23
Maiο	833	7,54	4	50	0,45
Junho	884	8,00	5	132	1,19
Julho	893	8,08	6	731	6,61
Agosto	987	8,93	7	781	7,07
Setembro	905	8,19	8	813	7,35
Outubro	942	8,52	9	818	7,40
Novembro	894	8,09	10	689	6,23
Dezembro	990	8,96	11	573	5,18
			12	484	4,38
<b>Dia da semana</b>	<b>Quantidade</b>	<b>%</b>	13	589	5,33
Domingo	1132	10,24	14	634	5,74
Segunda-feira	1665	15,06	15	722	6,53
Terça-feira	1559	14,10	16	680	6,15
Quarta-feira	1748	15,81	17	773	6,99
Quinta-feira	1707	15,44	18	823	7,45
Sexta-feira	1782	16,12	19	698	6,31
Sábado	1461	13,22	20	459	4,15
			21	270	2,44
			22	121	1,09
			23	98	0,89

Os incidentes se concentram no sentido Centro no período da manhã e no sentido Oeste no período da tarde, devido à natureza direcional do tráfego. Além disso, a quantidade de incidentes reduz bruscamente durante a madrugada, conforme Figura 5.8.

Os registros de campo ainda apresentavam informações sobre as condições climáticas no momento de casa incidente, assim verificou-se que 75,1% deles foram feitos com tempo bom, 16,7% com tempo nublado e 8,2% com chuva. Vale ressaltar que, em condições de chuva, a porcentagem de sinistros aumenta em relação aos outros tipos de incidentes: eles passam a representar 20,5% dos atendimentos. Com tempo nublado ou bom, esse índice é de 12% apenas.

Para aplicação do modelo, a Avenida Brasil e a Linha Vermelha foram divididas em 24 seções, sendo 12 por sentido. Cada seção possui uma frequência de ocorrência

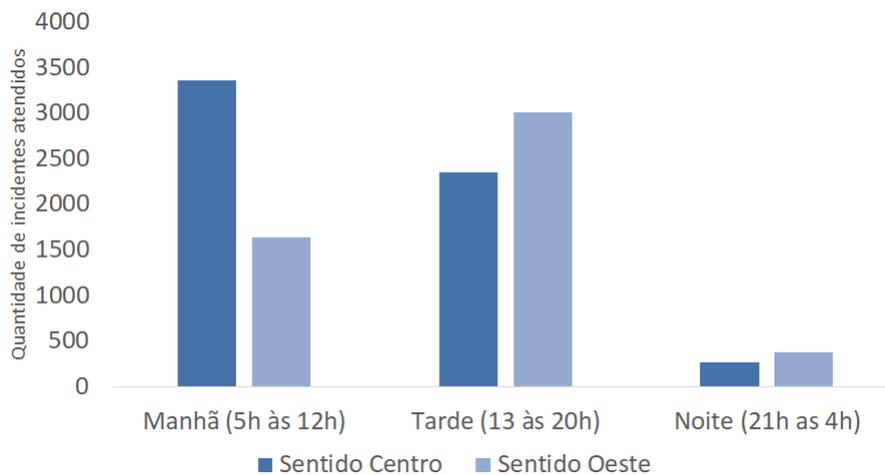


Figura 5.8: Quantidade de incidentes atendidos em 2018 por período do dia.

de incidentes correspondente e um tempo de resposta, que depende também da localização do equipamento de socorro. Dos 11.054 registros, 116 não possuíam endereço suficientemente detalhado, portanto para a aplicação do modelo matemático, foram utilizadas 10.938 ocorrências durante todo o ano.

Segundo ARENALES *et al.* [37], a distribuição exponencial é uma distribuição de probabilidade com propriedade de falta de memória, isto é, as probabilidades de chegadas nos próximos minutos não depende dos últimos minutos. Portanto, as distribuições dos tempos entre incidentes e dos tempos de atendimento podem ser representadas por distribuições exponenciais, como apresentado nas pesquisas de BOUYAHIA *et al.* [130] e CHOU e MILLER-HOOKS [131].

Para a realização dos testes estatísticos foi utilizada a ferramenta XLSTAT, um suplemento do *software* Excel. Foi realizado o teste estatístico Qui-quadrado e o teste de Kolmogorov-Smirnov, este último para os casos de seções com poucas amostras. A partir dos testes foi analisado o valor- $p$  e os gráficos de distribuição. Para avaliar a distribuição da frequência das ocorrências de incidentes foi considerado a diferença temporal entre uma ocorrência e a outra em cada seção atendida pelo mesmo tipo de reboque. Foram feitas ao todo 64 análises, visto que em algumas seções não havia um número de amostras suficiente para tal. Dos testes realizados, 73,4% se enquadraram em distribuições exponenciais ( $p > 0,005$ ), dessa forma, foram assim consideradas. Alguns histogramas obtidos nessas análises são apresentados nas Figuras 5.9(a) e 5.9(b). Com relação ao tempo de atendimento, considerou-se o tempo para a retirada do veículo da via fornecido pela equipe de campo, além disso, analisou-se separadamente os diferentes reboques presentes na operação, como pode ser observado nas Figuras 5.9(c) e 5.9(d).

Vale lembrar que este estudo de caso considerou apenas os atendimentos públicos,

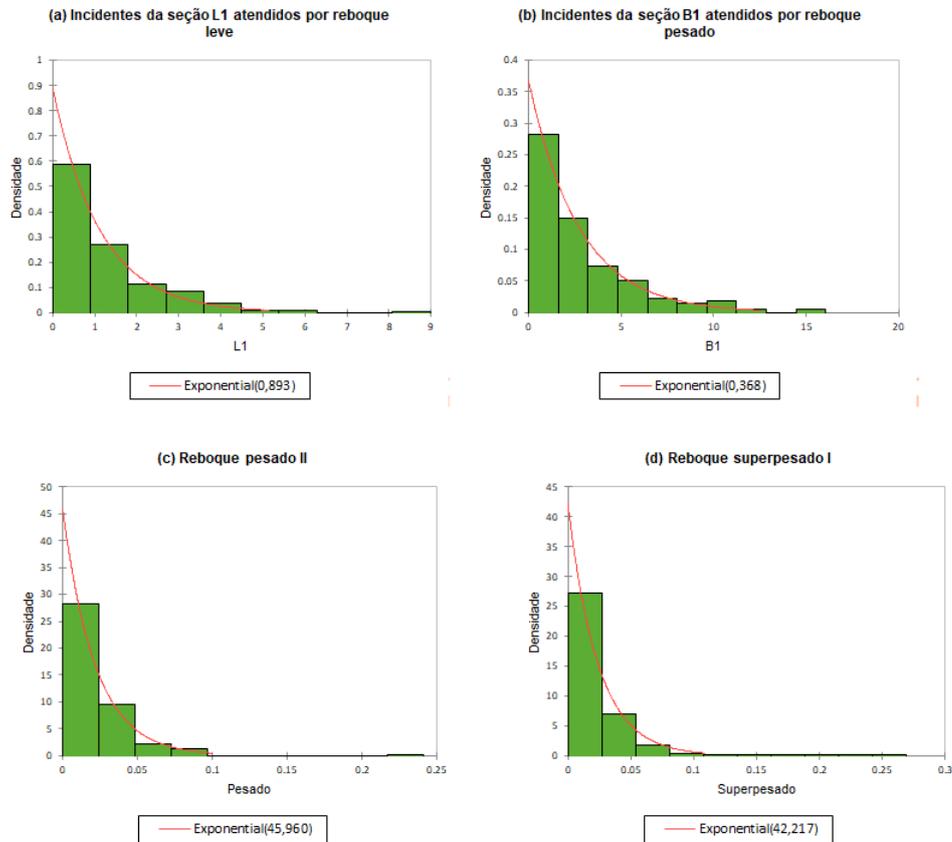


Figura 5.9: Exemplos dos histogramas de frequência e de atendimento dos incidentes.

realizados pela CET-Rio. Embora alguns incidentes sejam atendidos por empresas privadas como, por exemplo, seguradoras, optou-se por concentrar as análises no setor público devido à disponibilidade de dados.

As etapas seguidas para realização do estudo de caso apresentadas nas próximas seções estão apresentadas de maneira resumida na Figura 5.10.

## 5.1 Parâmetros do modelo

Algumas simplificações foram realizadas para modelar os incidentes analisados. Primeiramente, foi considerado que todos eles ocuparam apenas uma faixa de rolamento e a gravidade não foi considerada nem para redução da capacidade da via. Essa simplificação foi feita devido à ausência de informações no banco de dados disponibilizado. Além disso, considerou-se que todos os incidentes ocorridos na Avenida Brasil foram na pista central, visto que o banco de dados também não apresenta diferenciação entre pista lateral e central.

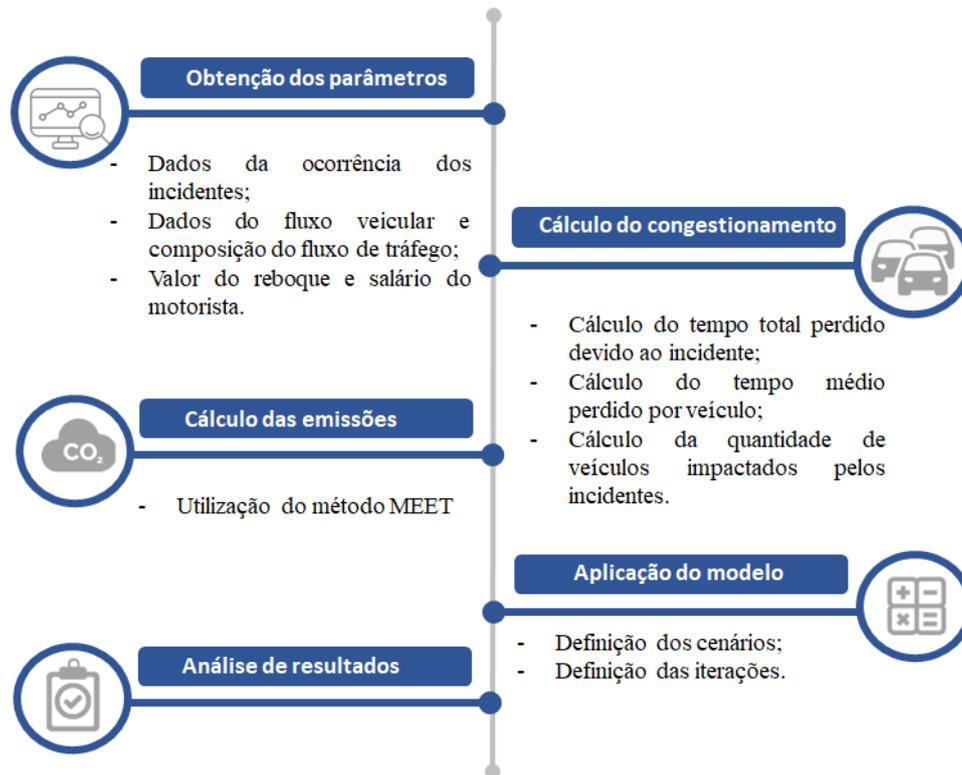


Figura 5.10: Etapas seguidas para realização do estudo de caso.

Os dados utilizados para determinação das emissões de  $CO_2$ , devido às filas de congestionamento, foram: (i) o fluxo veicular, obtido por meio de dados de contagens veiculares do sistema de fiscalização eletrônica; (ii) a composição do tráfego, obtida por meio de dados de contagem classificatória manual disponibilizada pela CET-Rio; e (iii) o tempo de resposta como sendo o tempo de deslocamento do reboque entre a seção onde ele estava localizado e o incidente, calculado com apoio do Google Maps, somado ao tempo de limpeza do incidente obtido a partir das anotações feitas em campo.

Destaca-se que ao calcular o tempo de resposta não foi considerado o congestionamento gerado pelo incidente, portanto o tempo de resposta pode ser ainda maior que o calculado. Também não há registro do tempo de detecção, por isso o mesmo não foi considerado.

Para a redução de capacidade devido aos incidentes e à fila de congestionamento, utilizou-se os valores propostos por TRB [45] apresentados na Tabela 3.1. Portanto, considerando que a Avenida Brasil possui quatro faixas de rolamento, a capacidade restante da via considerada foi de 58% e para a Linha Vermelha, que possui três faixas de rolamento, a capacidade restante considerada foi de 49%. A capacidade considerada na Linha Vermelha foi de 5.380 ucp/h e na Avenida Brasil de 6.080 ucp/h.

Tabela 5.2: Valores das constantes usadas na Equação 4.3.

Tipo veicular	$\kappa$	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
Veículos de passeio	601,2	-9,8381	0,0621	0	0	0	0
Ônibus e caminhões	871	-16	0,143	0	0	32031	0
Carretas	1574	-17,6	0	0,00117	0	36067	0

Fonte: HICKMAN [84]

Conforme descrito na Seção 4.1.2, o cálculo das emissões foi realizado pelo modelo MEET, com uma redução de velocidade de 40%. FHWA [132] mostrou uma redução de velocidade de 75% como um comportamento típico nas faixas com incidentes em vias expressas, já HAULE *et al.* [48] mostrou que essa redução pode ser de 25% na mesma situação. Sendo assim, considerou-se o valor intermediário de 40%. Vale ressaltar, no entanto, que esse valor pode variar fortemente. Por exemplo, quando a via apresenta faixas de largura superior a 3,6 m e um baixo fluxo de tráfego, a ocorrência de um incidente afeta pouco a velocidade da mesma. Já em vias estreitas e com alto fluxo de tráfego, a velocidade é mais impactada na presença do gargalo.

Para obtenção dos coeficientes da Equação (4.3), foram considerados três tipos veiculares, conforme proposto por BAI *et al.* [3]: (i) veículos menores que 3,5 toneladas, representando automóveis de passageiros e utilitários; (ii) veículos entre 3,5 e 7,5 toneladas, que representam caminhões; e (iii) veículos entre 3,5 e 16 toneladas, que são ônibus, conforme mostrado na Figura 5.11.

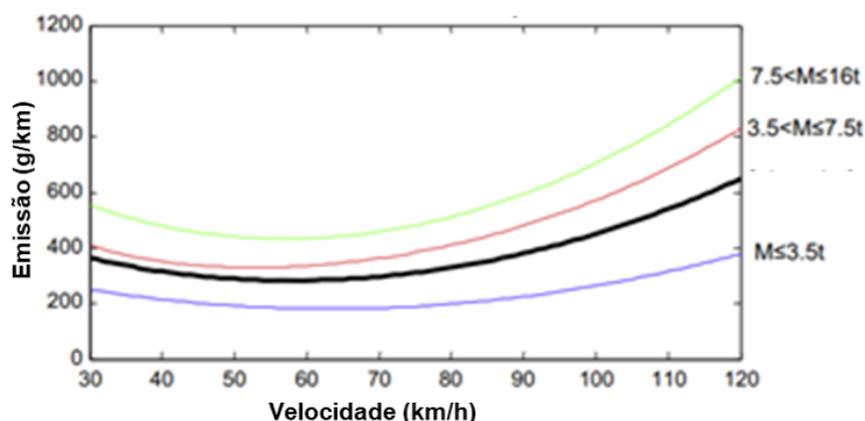


Figura 5.11: Emissão de carbono por tipo de veículo.

Fonte: BAI *et al.* [3].

Além desses tipos veiculares, foram utilizados os coeficientes de veículos pesados de 32 a 40 toneladas para representar as carretas que estão presentes na Avenida Brasil. Assim, a Tabela 5.2 mostra os valores utilizados para as constantes apresentadas na Equação (4.3) para cada tipo de veículo, conforme HICKMAN [84].

Outros parâmetros de entrada utilizados no presente estudo de caso estão apresentados na Tabela 5.3. A PREFEITURA RIO [133] atualmente paga o condutor do

reboque por mês conforme mostrado na Tabela 5.3, porém na aplicação do modelo matemático proposto foi considerada a possibilidade de ter uma quantidade menor de condutores em um dos períodos, para isso esse valor mensal é dividido por três, que corresponde a quantidade de turnos.

Tabela 5.3: Dados sobre aluguel e salários dos condutores

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor mensal adotado</b>
Valor do reboque leve	R\$ 15.347,00
Valor do reboque pesado	R\$ 23.034,00
Valor do reboque superpesado	R\$ 30.722,00
Valor da equipe do reboque por mês	R\$ 16.614,80

Fonte: PREFEITURA RIO [133]

## 5.2 Cenários estudados

Para realização dos testes e análise dos resultados, foram definidos oito cenários variando entre eles o tempo médio de atendimento e a Função Objetivo voltada para o número de ocorrências atendidas, conforme Tabela 5.4. Em todos eles até três reboques podem atender a mesma seção ( $reb = 3$ ) e o valor disponível máximo foi de R\$ 240 mil (orçamento) por mês.

Tabela 5.4: Tempo médio (minutos) para atendimento nos cenários estudados

<b>Cenário</b>	<b>Tipo de reboque</b>			<b>Função Objetivo de Atendimento</b>
	<b>Leve</b>	<b>Pesado</b>	<b>Superpesado</b>	
1	30	30	30	(4.8)
2	30	30	30	(4.9)
3	20	30	30	(4.8)
4	20	30	30	(4.9)
5	20	40	40	(4.8)
6	20	40	40	(4.9)
7	30	40	40	(4.8)
8	30	40	40	(4.9)

Para resolução do modelo multiobjetivo proposto, utilizou-se o método  $\varepsilon$ -Constraint. Dessa forma, uma função objetivo é selecionada para ser otimizada enquanto as demais são incorporadas ao conjunto de restrições (HAIMES [134]). Assim, optou-se por maximizar os atendimentos realizados e deixar as demais funções objetivos como restrições (veja Restrições (5.1) e (5.2)). Para aprimorar o

processo de solução, os parâmetros  $n_{emi}$  e  $n_{custo}$  foram considerados para normalizar as novas restrições.

$$\begin{aligned} & \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} E_{cld} h_{cld} + \sum_{o \in O} \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} E_{opd} h_{opd} + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} E_{tsd} h_{tsd} + \sum_{c \in C} \sum_{d \in D} E_{max_{cd}} (1 - \sum_{l \in L} h_{cld}) + \\ & \sum_{o \in O} \sum_{d \in D} E_{max_{od}} (1 - \sum_{p \in P} h_{opd}) + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} E_{max_{td}} (1 - \sum_{t \in T} h_{tsd}) \leq e_{emissao} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} & F_l \sum_{l \in L} y_{l1} + F_p \sum_{p \in P} y_{p1} + F_s \sum_{s \in S} y_{s1} + \\ & SAL \left( \sum_{l \in L} \sum_{d \in D} y_{ld} + \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} y_{pd} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} y_{sd} \right) \leq e_{custo} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Esse novo problema deve ser resolvido de forma iterativa, na qual os valores de  $e_{emissao}$  e  $e_{custo}$  variam em cada iteração. Eles iniciam com os valores máximos que podem ser atingidos e, a cada iteração, sofrem uma redução até chegar aos seus valores mínimos. Inicialmente, o valor máximo das emissões corresponde à soma dos maiores valores calculados para cada seção e o valor mínimo à soma dos menores valores. Esses dados foram então ajustados para cada cenário após experimentos iniciais com a finalidade de reduzir a quantidade de iterações. Com relação ao parâmetro  $e_{custo}$ , seu valor mínimo levou em conta a possibilidade de se ter apenas um reboque de cada tipo disponível durante todo o período. O seu valor máximo foi definido como sendo igual ao orçamento total disponível. Ao final desse processo, o conjunto de Soluções Ótimas de Pareto é obtido. Após a realização de experimentos iniciais, foi definido que a cada iteração, o valor de  $e_{emissao}$  diminuiria em 2.000 unidades e  $e_{custo}$  em 5.500. Por exemplo,  $custo = 5.500$  corresponde ao valor da equipe do reboque por mês em cada turno. Os valores máximos e mínimos para  $e_{emissao}$  e  $e_{custo}$  estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores utilizados					
Cenários		1 e 2	3 e 4	5 e 6	7 e 8
$e_{emissao}$	Máx.	212.000	286.000	274.000	212.000
	Min.	158.000	168.000	158.000	158.000
$e_{custo}$	Máx.	240.000	240.000	240.000	240.000
	Min.	130.000	130.000	130.000	130.000

### 5.3 Resultados e Discussões

Para realização dos experimentos computacionais, o modelo matemático foi codificado utilizando o software FICO ©Xpress-IVE 1.24.24 64 bits em um computador IntelR©CoreTMi7-3770U CPU 3.40GHz 2.6 GHz com 12 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 Home 64 bits. Os resultados para os cenários estabelecidos na Seção 5.2 são discutidos no decorrer dessa seção.

A Tabela 5.6 exhibe o número de passos realizados com o  $\varepsilon$ -Constraint e a quantidade de soluções não-dominadas encontradas em cada cenário, além dos tempos computacionais e dos GAPs. A coluna *Total* indica o tempo total utilizado pelo método  $\varepsilon$ -Constraint e as colunas *Mín.*, *Méd.* e *Máx.* indicam, respectivamente, o tempo mínimo, médio e máximo por iteração.

Foi considerado dez minutos como tempo máximo por iteração do método  $\varepsilon$ -Constraint, entretanto, o *solver* XPress FICO ultrapassou esse limite em alguns momentos, como no caso do Cenário 1 no qual uma iteração levou 631,87 segundos para ser concluída.

Quando o *solver* finaliza a iteração devido ao tempo máximo, a solução ótima não pode ser garantida, o que gera GAPs. Por exemplo, durante o processamento do Cenário 2, uma iteração terminou com um GAP residual de 3,90%, portanto a sua solução ótima não foi obtida. Assim, após analisar todos os passos do Cenário 2, não se pode garantir que as soluções não-dominadas encontradas formam o Pareto Ótimo.

Analisando os quatro cenários estudados com a Função Objetivo (4.8), notou-se que o Cenário 1 foi o que teve maior número de soluções não-dominadas (veja Tabela 5.6). Já o Cenário 7 foi o que apresentou o maior tempo médio e máximo de CPU. Os Cenários 3 e 5, nos quais o tempo de atendimento do reboque leve é menor, apresentaram os menores tempos médios por iteração. Esses cenários também não resultaram em GAP, conforme pode ser observado. Ao analisar os cenários propostos com a Função Objetivo (4.9), notou-se que os Cenários 4 e 6 são aqueles com menores tempo de CPU por iteração e com as menores quantidades de soluções não-dominadas. Já os Cenários 2 e 8 apresentam maiores tempo de execução.

Portanto, nota-se que os cenários com menor tempo disponível para os reboques leves foram resolvidos com os menores tempos computacionais, independente do tempo disponível para os reboques pesados e superpesados realizarem seus atendimentos. De maneira geral, os cenários com maior tempo disponível para todos os reboques foram os que apresentaram maior tempo de processamento.

Tabela 5.6: Resultados dos processos de otimização do  $\varepsilon$  - constraint

Cenário	Número de Passos	Soluções não-dominadas	Tempo de CPU (s)			GAP máximo (%)	
			Total	Mín.	Méd.		Máx.
1	223	82	45.882,25	12,43	205,75	631,87	0,93
2	223	43	45.322,52	36,80	203,24	623,80	3,90
3	441	63	36.783,81	8,74	83,41	244,96	0,00
4	441	24	49.590,45	25,40	112,45	171,57	0,00
5	446	51	42.816,00	15,76	96,00	224,72	0,00
6	446	23	45.804,20	21,23	102,70	177,08	0,00
7	263	44	116.921,91	7,62	444,57	644,49	0,84
8	263	33	56.132,09	37,73	213,43	616,05	4,60

Com os resultados foi possível observar que, com o mesmo custo, ao priorizar a maximização do número de incidentes atendidos, ocorre um aumento nas emissões de  $CO_2$ . Da mesma forma, quando a prioridade é minimizar as emissões de  $CO_2$ , há uma redução no número de incidentes atendidos. Já em relação ao custo, quanto maior o custo, menor a emissão ou maior a quantidade de incidentes atendidos. Isso mostra a compensação entre os três objetivos propostos. Além disso, quanto menor o tempo de serviço esperado para atendimento, maior é o impacto do orçamento empregado na operação. Sendo assim, os resultados obtidos em cada cenário são analisados.

### 5.3.1 Cenário 1

A Figura 5.12 apresenta o conjunto de soluções não-dominadas do Cenário 1 que possui o maior número de soluções não-dominadas. Como esse cenário apresenta GAP, a Figura 5.12 não representa o seu Pareto Ótimo.

Quanto aos atendimentos realizados pelos reboques leves, observou-se que todas as ocorrências são atendidas em 52% das soluções. Mesmo a solução que apresenta a menor quantidade de atendimentos, nota-se que ela atende 99,4% dos incidentes. Esse Cenário 1 possui um tempo médio para atendimento maior para os reboques leves, o que justifica essa quantidade elevada de incidentes atendidos. A quantidade de reboques leves disponíveis variou entre um e cinco.

Os reboques pesados atendem entre 64,3% e 93,4% do total de ocorrências com ônibus e caminhões. A quantidade desse tipo de reboque disponível variou entre um e três, sendo que 80,23% dos resultados apresentaram mais de um reboque pesado alocado em seções. Os reboques superpesados atenderam entre 55,9% e 83,9% do total de incidentes com carretas, já a quantidade desse tipo de reboque variou entre um e dois.

A solução com o maior número de incidentes atendidos (10.740) é também a que

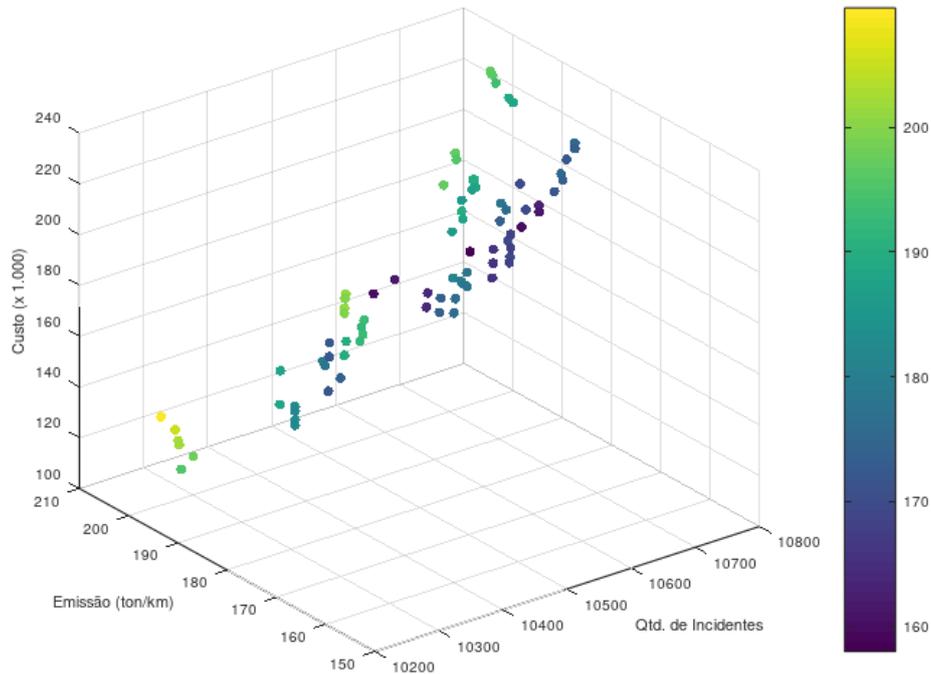


Figura 5.12: Resultados obtidos no Cenário 1.

possui o maior custo (R\$ 233.893,00). Nela foi considerado um reboque leve, três pesados e dois superpesados no período da manhã e da tarde. No período noturno, foram alocados um reboque leve, um pesado e um superpesado. Quanto à emissão, essa solução apresentou 196,88 toneladas por quilômetro.

A solução com menor emissão (157,97 toneladas/quilômetro) teve um custo de R\$ 231.678,00. Nela foram alocados quatro rebocues leves, dois pesados e um superpesado no período da manhã e da tarde, e um reboque de cada tipo no período noturno. Com essa composição, 10.410 incidentes foram atendidos. Observa-se que essa solução atendeu 3% menos incidentes que a solução citada anteriormente, com custo 1% menor.

Foram obtidas seis soluções não-dominadas com o menor custo total (R\$ 118.603,00). A Figura 5.13 mostra a variação desses resultados quanto à quantidade de incidentes atendidos e à emissão de  $CO_2$ . A quantidade de incidentes atendidos variou entre 10.250 e 10.324. Por outro lado, quanto maior a quantidade de incidentes atendidos, maior a emissão de  $CO_2$  que, neste caso, variou entre 195,85 e 209,56 toneladas/quilômetro. Isso ocorre porque, com o mesmo orçamento disponível, busca-se atender as seções com maiores ocorrências de incidentes ou aquelas com maiores emissões.

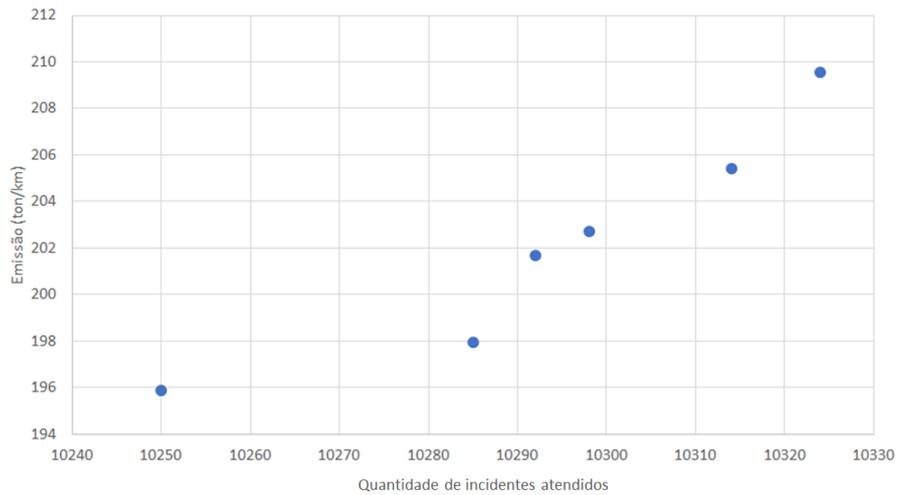


Figura 5.13: Resultados obtidos no Cenário 1 com o custo de R\$ 118.603,00.

### 5.3.2 Cenário 2

A Figura 5.14 apresenta o conjunto de soluções não-dominadas do Cenário 2. Em todas elas, foram alocados apenas um reboque pesado, apesar de ocorrer uma variação na quantidade de incidentes atendidos. Já a quantidade de reboques leves variaram entre um e cinco e pesados entre um a dois. Assim como no Cenário 1, a Figura 5.14 não representa o Pareto Ótimo do Cenário 2 pois algumas iterações apresentaram GAPS.

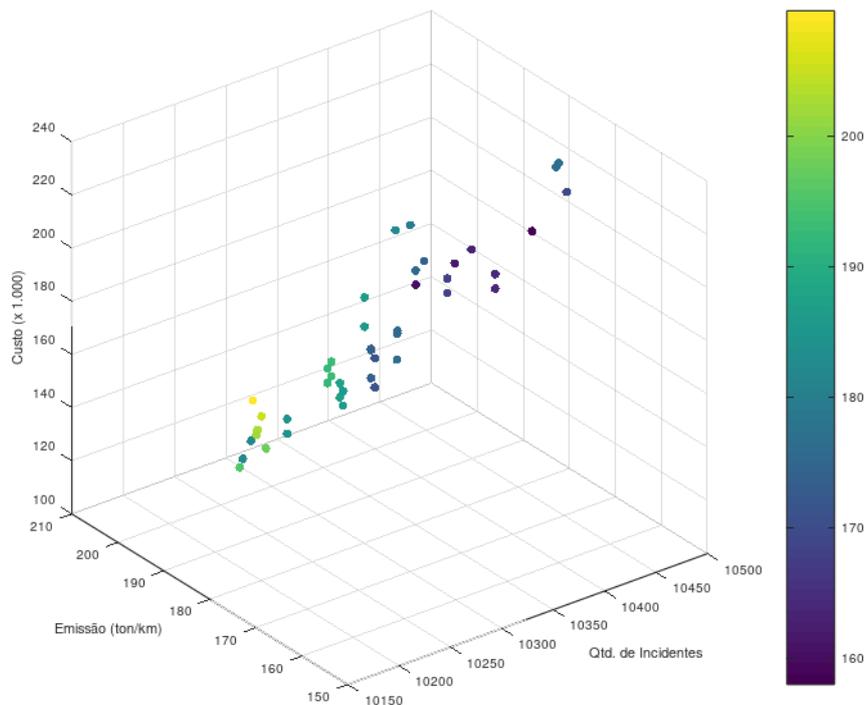


Figura 5.14: Resultados obtidos no Cenário 2.

Todas as ocorrências que envolvem reboques leves são atendidas em 32,6% das soluções. Mesmo a solução que possui a menor porcentagem de atendimentos, tem uma alta taxa de ocorrências servidas (99,2%), como observado no Cenário 1. Já os atendimentos com reboques pesados variaram entre 64,3% e 81,3% do total de ocorrências. Por último, os reboques superpesados atenderam entre 53,4% e 65,1% das ocorrências envolvendo carretas.

A solução com o maior número de incidentes atendidos (10.475) teve um custo total de R\$ 221.831,00 e emissão de  $CO_2$  de 176,73 toneladas/quilômetro. Ela utiliza três reboques leves, dois pesados e um superpesado durante todos os períodos. Já a solução com a menor emissão (157,98 toneladas/quilômetro) tem um custo total de R\$ 231.678,00, que é o maior dentre as soluções não-dominadas desse Cenário 2. Nesse caso, 10.365 incidentes são atendidos com quatro reboques leves, dois pesados e um superpesado durante a manhã e a tarde, e um reboque de cada tipo a noite.

### 5.3.3 Cenário 3

A Figura 5.15 apresenta o Pareto Ótimo do Cenário 3, pois GAPs não foram encontrados durante as iterações do método  $\varepsilon$ -Constraint. Detaca-se ainda que esse cenário foi o que apresentou o menor tempo total de CPU.

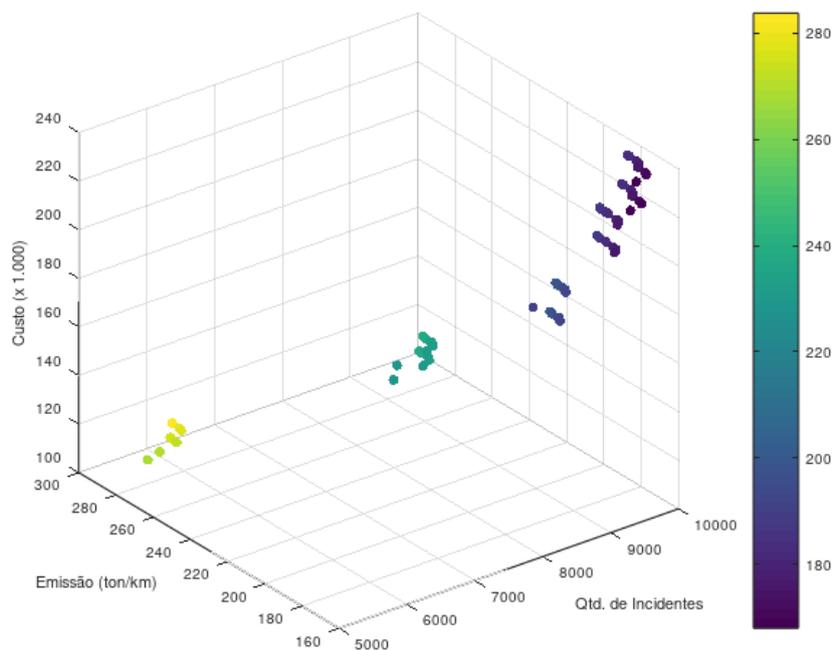


Figura 5.15: Resultados obtidos no Cenário 3 (Pareto Ótimo).

Houve uma grande variação quanto à quantidade de atendimentos realizados pelos reboques leves. Esse número variou entre 4.065 (44% do total) e 8.806 (95,5% do total). Portanto, nenhuma solução não-dominada consegue atender a todas as

ocorrências envolvendo veículos leves e utilitários. Porém, é possível observar que o custo da operação tem grande influência na quantidade de atendimentos. Neste cenário, a quantidade de reboques leves alocados variou entre um e cinco.

Já a quantidade de atendimentos realizados pelos reboques pesados e superpesados não tiveram grandes variações. Além disso, em todas as soluções havia apenas um reboque disponível de cada tipo durante todos os períodos. O número de atendimentos com reboques pesados variou entre 64,3% e 65,8% do total das ocorrências. Com reboque superpesado, essa variação foi de 55,9% a 65,1%. Observa-se, portanto, que quando se espera um nível de serviço melhor para os atendimentos com reboques leves, busca-se aumentar a quantidade desse tipo de equipamento na operação.

A solução com o maior número de incidentes atendidos (9.932) é também a que possui o maior custo (R\$ 234.991,00). Nela foram alocados cinco reboques leves, um pesado e um superpesado no período da manhã e da tarde, e três reboques leves, um pesado e um superpesado no período noturno. Quanto à emissão, esse cenário apresentou 184,79 toneladas por quilômetro. A solução com menor emissão (167,91 toneladas/quilômetro) e a com maior número de atendimentos tem o mesmo custo associado, porém o total de ocorrências atendidas foi menor (9.595 incidente) no primeiro caso. Assim, com o mesmo orçamento, essa solução atendeu menos incidentes (3,4% a menos), porém reduziu as emissões de  $CO_2$  em 9,2%.

A Figura 5.16 mostra as soluções não-dominadas obtidas pelo modelo matemático para o menor e maior valor de orçamento. Ao considerar o menor custo, verifica-se que oito soluções não-dominadas são obtidas. Nelas, o total de incidentes atendidos variou entre 5.934 e 5.137 e a emissão entre 267,87 e 283,79 toneladas/quilômetro.

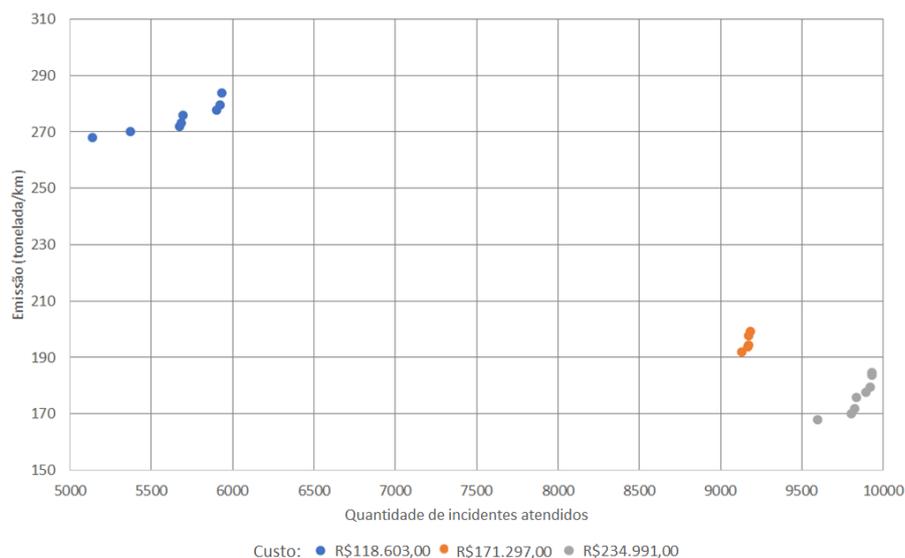


Figura 5.16: Resultados obtidos no Cenário 3 com diferentes valores de orçamento.

Observa-se que aumentando o custo em 98% (de R\$ 118.603,00 para R\$ 234.991,00), a quantidade de atendimentos aumenta em 73% e a emissão reduz em 35,8%. Além disso, na Figura 5.16 também é possível observar as soluções-não dominadas com o custo total de R\$ 171.297,00. Se comparado com a solução de menor custo, o aumento do custo é de 44%, porém o aumento dos incidentes atendidos é de 61,7% e a redução das emissões de 28,9%. Observa-se também que ao comparar a solução de custo igual a R\$ 171.297,00 com a solução de custo igual a R\$ 234.991,00, na primeira são atendidas 6,9% menos ocorrências e as emissões são 10,7% maiores.

### 5.3.4 Cenário 4

A Figura 5.17 apresenta o Pareto Ótimo do Cenário 4. A solução não-dominada com maior número de atendimentos (9.436) é também a que possui o maior custo (R\$ 234.991,00) e a segunda menor emissão das soluções não-dominadas (168,00 toneladas/quilômetro). Nela foram alocados cinco reboques leves, um pesado e um superpesado no período da manhã e da tarde, e três reboques leves, um pesado e um superpesado no período noturno. Já a solução com a menor emissão (167,991 toneladas/quilômetro), atendeu 9.411 incidentes e teve um custo total de R\$ 223.991,00. Comparando a quantidade de reboques alocados entre essas duas soluções, observa-se que a de menor emissão tem apenas um reboque leve a noite.

Foram encontradas oito soluções não-dominadas com o menor custo. Dentre elas, a com menor emissão também foi obtida no Cenário 3. Por outro lado, a que possui maior número de incidentes atendidos apresenta a mesma quantidade de atendimentos do Cenário 3, porém com uma emissão ligeiramente inferior (0,075%).

### 5.3.5 Cenário 5

A Figura 5.18 apresenta o Pareto Ótimo do Cenário 5. Assim como no Cenário 3, a quantidade de atendimentos realizados pelos reboques leves possui uma grande faixa de variação, oscilando entre 4.065 (44%) e 8.806 (95,5%), o que já era esperado pelos dois cenários possuírem o mesmo tempo de atendimento médio. A quantidade de reboques leves disponíveis também variou entre um e cinco. Como o tempo médio de atendimento esperado dos reboques pesados e superpesados são maiores nesse cenário, houve um aumento considerável em relação ao número de atendimentos desses equipamentos, apesar do modelo indicar apenas um reboque de cada tipo durante todos os períodos. A quantidade de incidentes atendidos pelos reboques pesados variou entre 95,8% e 99,2% do total das ocorrências e do superpesado entre 84,4% e 93,7%.

A solução com o maior número de incidentes atendidos (10.472) é também a com

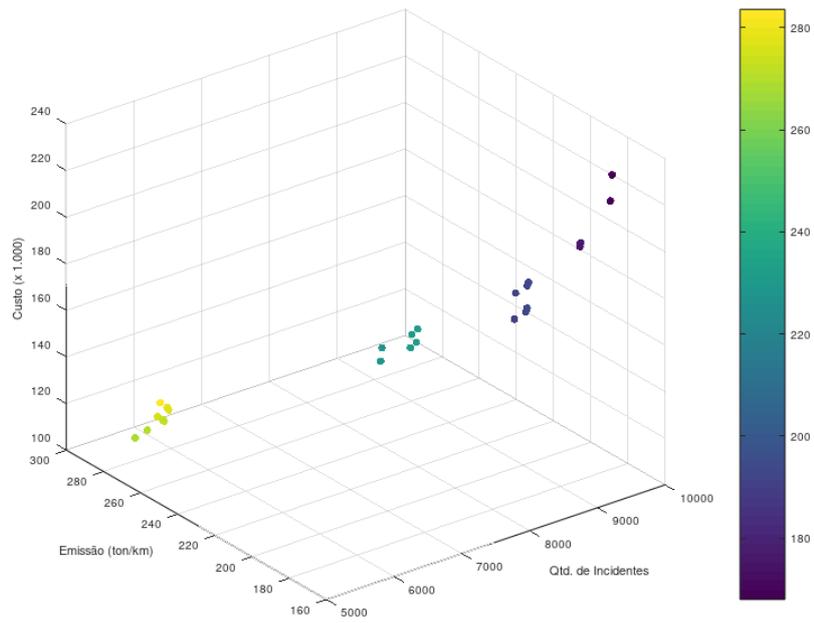


Figura 5.17: Resultados obtidos no Cenário 4 (Pareto Ótimo).

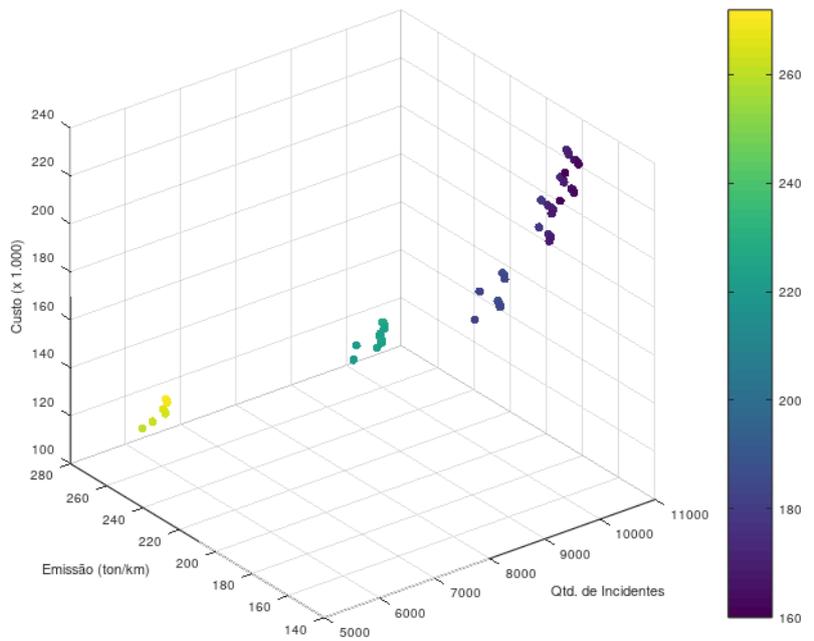


Figura 5.18: Resultados obtidos no Cenário 5 (Pareto Ótimo).

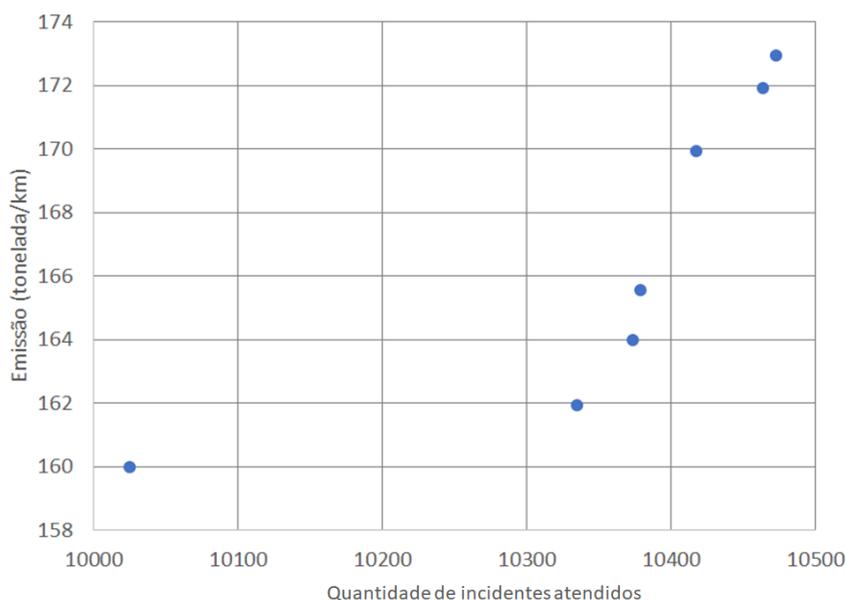


Figura 5.19: Resultados obtidos no Cenário 5 com o custo de R\$ 234.991,00.

maior custo (R\$ 234.991,00). Nela foram alocados cinco reboques leves, um pesado e um superpesado no período da manhã e da tarde, e três reboques leves, um pesado e um superpesado no período noturno. Quanto à emissão, essa solução apresentou 172,97 toneladas por quilômetro, veja Figura 5.19. A solução com menor emissão (159,99 toneladas/quilômetro) tem o mesmo custo da solução com maior número de atendimentos, porém a sua quantidade de incidentes atendidos é menor (10.024 ocorrências), como também pode ser observado na Figura 5.19. Esse resultado é muito semelhante ao observado no Cenário 2, porém como o tempo médio de atendimento dos reboques pesados e superpesados são maiores, um maior número de incidentes foram atendidos com uma menor emissão.

Foram obtidas sete soluções não-dominadas com o menor custo total (R\$ 118.603,00). A quantidade de incidentes atendidos com esse custo apresentou uma variação entre 5.647 e 6.468 e, quanto maior a quantidade de incidentes atendidos, maior a emissão de  $CO_2$ , que variou entre 259,99 e 271,87 toneladas/quilômetro.

### 5.3.6 Cenário 6

A Figura 5.20 apresenta o Pareto Ótimo do Cenário 6. Nessas soluções não-dominadas, a quantidade de reboques leves alocados variou entre um e cinco e em todas elas foram utilizados apenas um reboque pesado e um superpesado.

A solução com maior número de incidentes atendidos (9.823) é também a que possui o maior custo (R\$ 234.991,00), com emissão de 161,99 toneladas/quilômetro. A solução com menor emissão (159,99 toneladas/quilômetro) também tem custo de R\$ 234.991,00, porém atende a um número menor de ocorrências (9.793). Foram

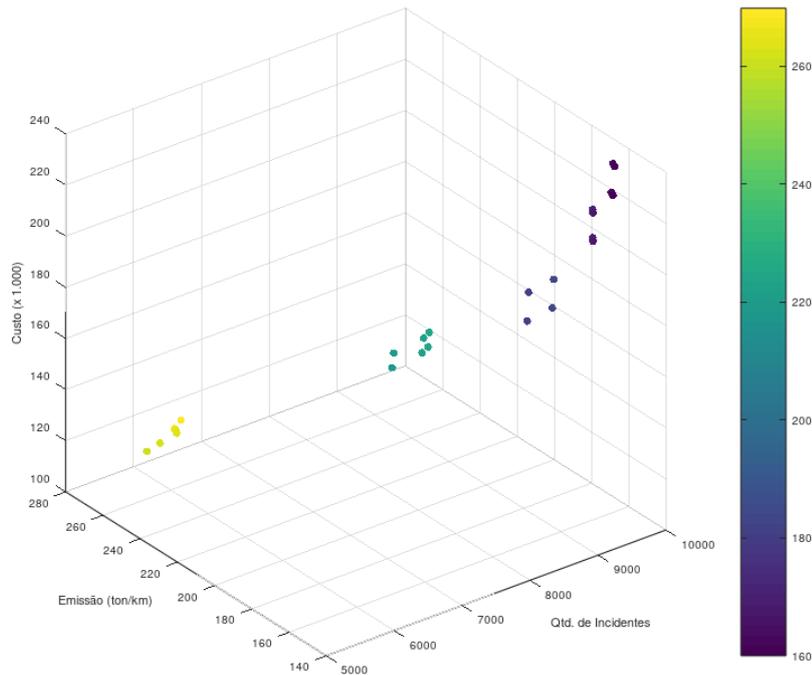


Figura 5.20: Resultados obtidos no Cenário 6 (Pareto Ótimo).

obtidas seis soluções não-dominadas com o menor custo (R\$ 118.603,00). A quantidade de incidentes atendidos com esse custo variou entre 6.422 e 5.647 e a emissão de  $CO_2$  oscilou entre 259,99 e 269,874 toneladas/quilômetro.

### 5.3.7 Cenário 7

A Figura 5.21 mostra o conjunto de soluções não-dominadas do Cenário 7. Ele é o que possui maior tempo médio disponível para todos os tipos de reboques. Além disso, o resultado apresentou um GAP máximo de 0,84% e o maior tempo total de CPU.

Assim como no Cenário 1, esse cenário não apresentou grande variação nos atendimentos realizados pelos reboques leves. Todas as ocorrências envolvendo veículos leves e utilitários são atendidas em 80,4% das soluções encontradas. Além disso, apenas 0,6% das ocorrências não são atendidas na solução que apresenta menor número de atendimentos. A quantidade de reboques leves nesse cenário variou entre um e cinco.

Como no Cenário 5, os atendimentos a ocorrências com reboques pesados e superpesados não tiveram grandes variações, porém neste caso houveram soluções em que todas as ocorrências foram atendidas.

Como o nível de serviço esperado para os atendimentos com reboques leves é menor, o modelo também busca um melhor atendimento dos outros tipos de reboque.

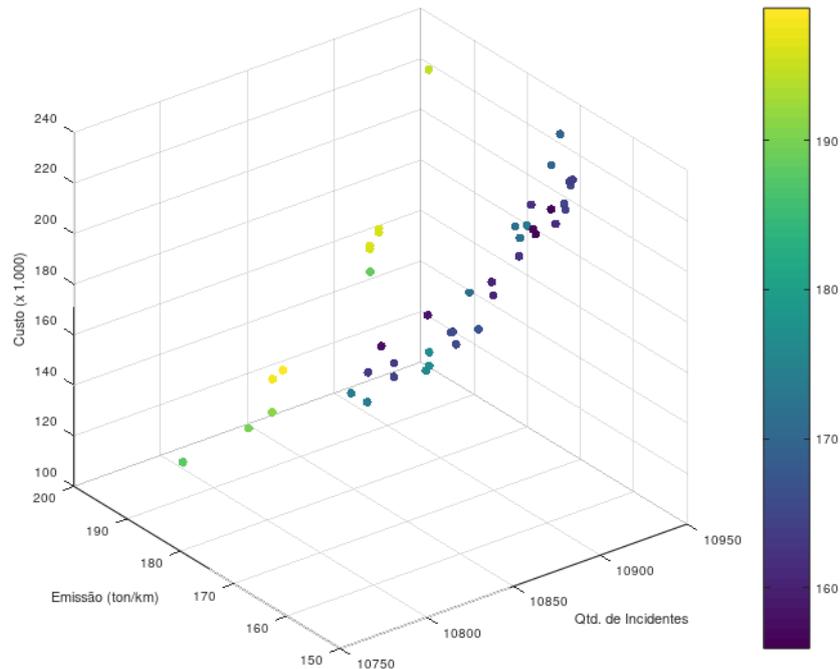


Figura 5.21: Resultados obtidos no Cenário 7.

A menor quantidade de atendimentos realizados pelos reboques pesados corresponde a 95,8% das ocorrências e do superpesado a 86,9%.

A solução com o maior número de incidentes atendidos (10.938) é também a com maior custo (R\$ 231.706,00). Nela foram considerados dois reboques de cada tipo no período da manhã e da tarde, e dois reboques leves, um pesado e dois superpesados no período noturno. Quanto à emissão, esse cenário apresentou 169,93 toneladas/quilômetro.

Já a solução com menor emissão (155,94 toneladas/quilômetro) tem um custo de R\$ 223.991,00. Nela, foram considerados cinco reboques leves, um pesado e um superpesado no período da manhã e da tarde, e um reboque de cada tipo no período noturno. Com essa composição, 10.881 incidentes foram atendidos. Nesse caso, as menores emissões foram obtidas em soluções que alocavam quatro ou cinco reboques leves.

Quanto às soluções com menor custo, cinco soluções não-dominadas foram obtidas. O total de incidentes atendidos por elas variou entre 10.776 e 10.858, já a emissão oscilou entre 187,99 e 197,85 toneladas/quilômetro.

### 5.3.8 Cenário 8

A Figura 5.22 apresenta o conjunto de soluções não-dominadas do Cenário 8 que apresentou uma iteração com GAP de 4,6%. Ele não apresentou grande variação nos atendimentos realizados pelos reboques leves. Em 22,2% das soluções não-

dominadas, todos os incidentes envolvendo esse tipo de reboque foram atendidos. Quanto aos incidentes atendidos pelos reboques pesados e superpesados, em nenhuma das soluções todas as ocorrências foram servidas.

Nas soluções não-dominadas, a quantidade de reboques leves variou entre um e cinco, pesados entre um e dois e em todas as soluções foi alocado apenas um reboque superpesado.

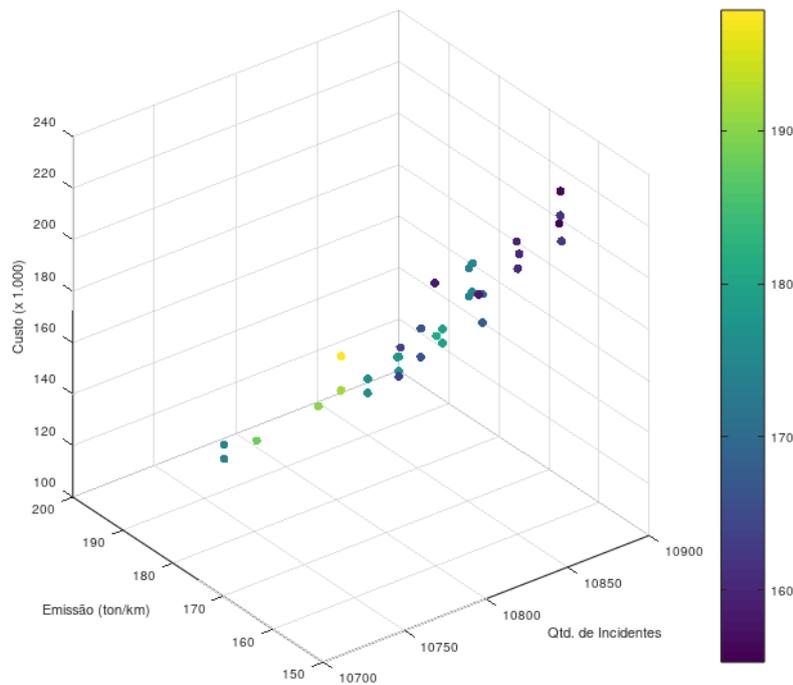


Figura 5.22: Resultados obtidos no Cenário 8.

A solução com maior número de incidentes atendidos (10.883) teve um custo de R\$ 203.144,00 e emissão de  $CO_2$  de 161,98 toneladas/quilômetro. Nessa solução, foram alocados quatro reboques leves nos períodos da manhã e da tarde, e dois reboques leves no período da noite. Além disso, um reboque pesado e um superpesado foram utilizados durante todos os períodos.

Já a solução com menor emissão (155,29 toneladas/quilômetro) atendeu 10.861 incidentes e teve como custo total R\$ 223.991,00. Foram alocados cinco reboques leves nos períodos da manhã e da tarde, um reboque pesado e um superpesado durante todos os períodos, com um reboque leve a noite. Quanto às soluções com menor custo, foram obtidas quatro não-dominadas. Nesse caso, o total de incidentes atendidos variou entre 10.776 e 10.858 e as emissões entre 187,99 e 197,87 toneladas/quilômetro.

### 5.3.9 Análise Comparativa

A Tabela 5.7 faz um resumo dos resultados obtidos nos diferentes cenários. Por exemplo, no Cenário 1 são apresentados os resultados com maior quantidade de incidentes atendidos (10.740 incidentes, com emissão de 196,88 ton/km e custo de R\$ 233.893,00), com a menor emissão (10.410 incidentes atendidos, emissão de 157,97 ton/km e custo de R\$ 231.678,00) e com menor custo, porém neste último caso são apresentados dois resultados: com menor custo e maior quantidade de incidentes atendidos; e com menor custo e menor emissão.

Comparando os Cenários 1, 2, 3 e 4, nota-se que os resultados foram semelhantes com um menor custo, porém, nos Cenários 2 e 4, observa-se que a quantidade de incidentes atendidos é menor mesmo quando busca-se maximizar a quantidade de incidentes atendidos. Já comparando os Cenários 5 e 6, nota-se que mesmo com um menor custo, a quantidade total de incidentes atendidos no Cenário 6 foi menor até na solução que atendeu o maior número de ocorrências, porém a emissão também foi menor se comparada com a solução com o mesmo custo e com maior quantidade de incidentes atendidos obtida no Cenário 5. Ao comparar as soluções com o maior número de atendimentos dos Cenários 7 e 8, nota-se que a solução deste último teve uma menor quantidade de incidentes atendidos, porém uma menor emissão e um menor custo.

Tabela 5.7: Comparação entre os resultados obtidos

		<b>Qtd. de incidentes</b>	<b>Emissão (ton/Km)</b>	<b>Custo (R\$)</b>
<b>Cenário 1</b>	Maior n° de incidentes	10.740	196,88	233.893,00
	Menor emissão	10.410	157,97	231.678,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	10.324	209,56	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	10.250	195,85	118.603,00
<b>Cenário 2</b>	Maior n° de incidentes	10.475	176,73	221.831,00
	Menor emissão	10.365	157,98	231.678,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	10.324	209,56	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	10.250	195,85	118.603,00
<b>Cenário 3</b>	Maior n° de incidentes	9.932	184,79	234.991,00
	Menor emissão	9.595	167,91	234.991,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	5.934	283,79	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	5.137	267,87	118.603,00
<b>Cenário 4</b>	Maior n° de incidentes	9.463	168	234.991,00
	Menor emissão	9.411	167,99	223.991,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	5.934	283,57	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	5.137	267,87	118.603,00
<b>Cenário 5</b>	Maior n° de incidentes	10.472	172,97	234.991,00
	Menor emissão	10.024	159,99	234.991,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	6.468	271,87	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	5.647	259,99	118.603,00
<b>Cenário 6</b>	Maior n° de incidentes	9.823	161,99	234.991,00
	Menor emissão	9.793	159,99	234.991,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	6.422	269,87	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	5.647	259,99	118.603,00
<b>Cenário 7</b>	Maior n° de incidentes	10.938	169,93	231.706,00
	Menor emissão	10.881	155,94	223.991,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	10.858	197,85	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	10.776	187,99	118.603,00
<b>Cenário 8</b>	Maior n° de incidentes	10.883	161,98	203.144,00
	Menor emissão	10.861	155,29	223.991,00
	Menor custo com maior n° de incidentes	10.858	197,87	118.603,00
	Menor custo com menor emissão	10.776	187,99	118.603,00

Observa-se portanto que, no geral, ao utilizar as variáveis de decisão  $h_{cd}$ ,  $h_{opd}$  e  $h_{tsd}$  (ver Tabela 4.3) na Função Objetivo que busca maximizar a quantidade de atendimentos, a quantidade de incidentes atendidos é maior que ao utilizar as variá-

veies de decisão  $x_{cld}$ ,  $x_{opd}$  e  $x_{tsd}$  como é possível observar na Figura 5.23, nas quais em vermelho estão as soluções não-dominadas dos Cenários 1, 3, 5 e 7 e, em verde, as dos outros cenários. Com a Função Objetivo (4.9), nenhuma das soluções atendeu a todas as ocorrências.

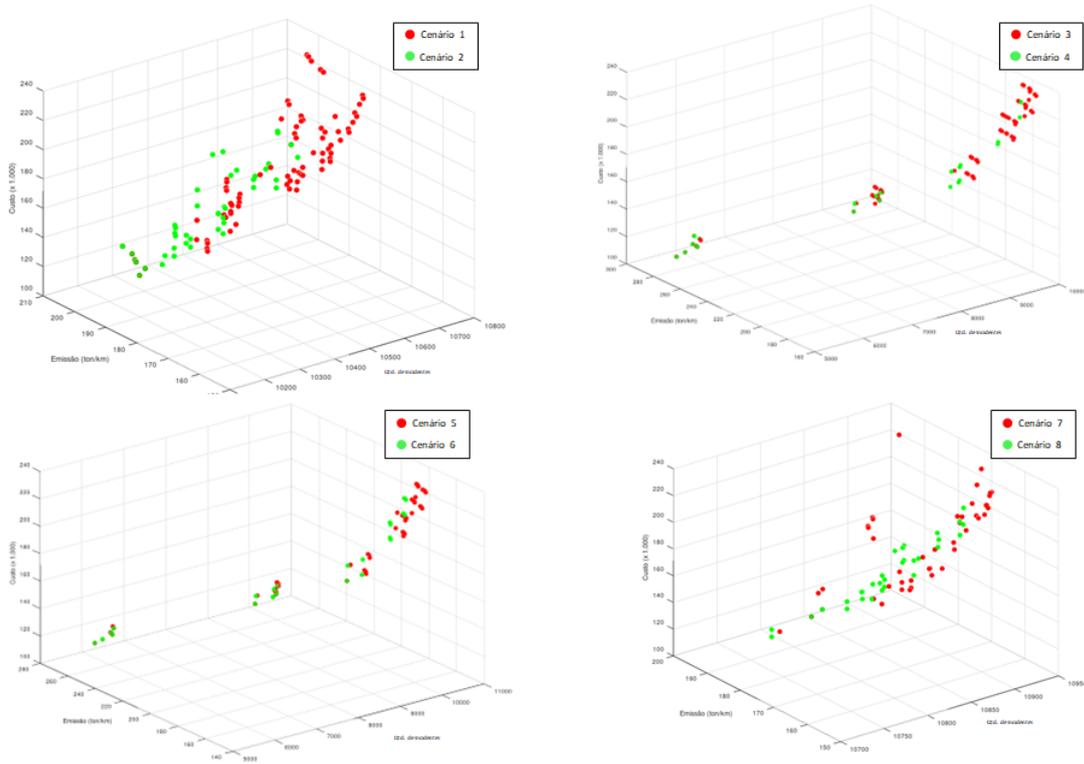


Figura 5.23: Comparação entre os resultados obtidos com as diferentes Funções Objetivo (4.8) e (4.9).

As Figuras 5.24 e 5.25 mostram mais detalhadamente os resultados dos Cenários 1 e 2. Nota-se, no destaque feito na cor amarela, 5.24, que houve um maior número de atendimentos com o mesmo custo de operação no Cenário 1. Já observando o destaque da Figura 5.25, é possível notar que esse cenário também apresentou maiores emissões.

Ao observar a alocação dos reboques, nota-se que nos resultados com os custos mais altos e com a mesma quantidade de reboques, eles geralmente ficam alocados na mesma seção, entretanto as seções com incidentes atendidos mudam se o enfoque é atender o maior número de incidentes ou minimizar a emissão.

Na Figura 5.26 é observado a localização dos reboques leves no período da manhã com o custo de R\$ 118.603,00, considerando diferentes emissões e quantidades de incidentes atendidos. Já na Figura 5.27 são mostradas as localizações dos reboques leves no período da manhã com o custo de R\$ 144.950,00 considerando os dois diferentes enfoques, emissão e quantidade de incidentes atendidos.

Com custos mais baixos e com o enfoque de minimizar emissões, nota-se que

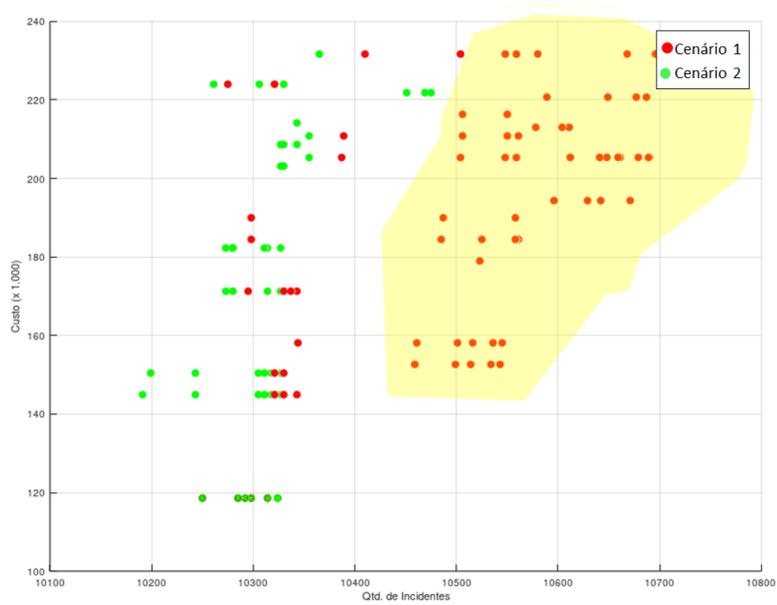


Figura 5.24: Comparação entre os resultados obtidos nos Cenários 1 e 2 considerando quantidade de atendimentos e custo.

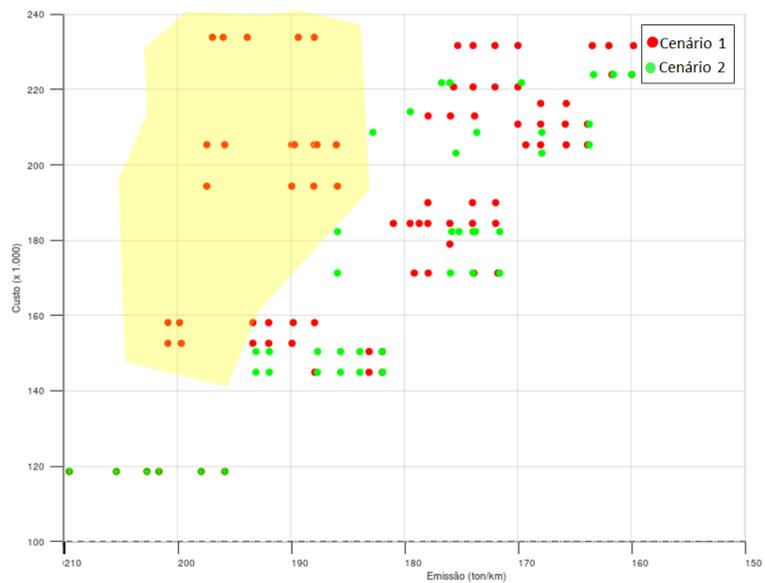


Figura 5.25: Comparação entre os resultados obtidos nos Cenários 1 e 2 considerando emissão e custo.

os reboques ficam alocados mais próximos das seções nas quais os incidentes geram maior fila de congestionamento (observe que os reboques verde e azul na Figura 5.26 estão mais próximos do Centro, região com maior fluxo viário). Já quando o foco principal é na quantidade de incidentes atendidos, os reboques ficam posicionados mais distantes da região central, porém buscam atender mais seções. O mesmo pode ser observado na Figura 5.27.

Outra observação é que um maior número de seções é atendido por mais de um



Figura 5.26: Resultado obtido para reboques leves pela manhã no Cenário 3 com o custo de R\$ 118.603,00.

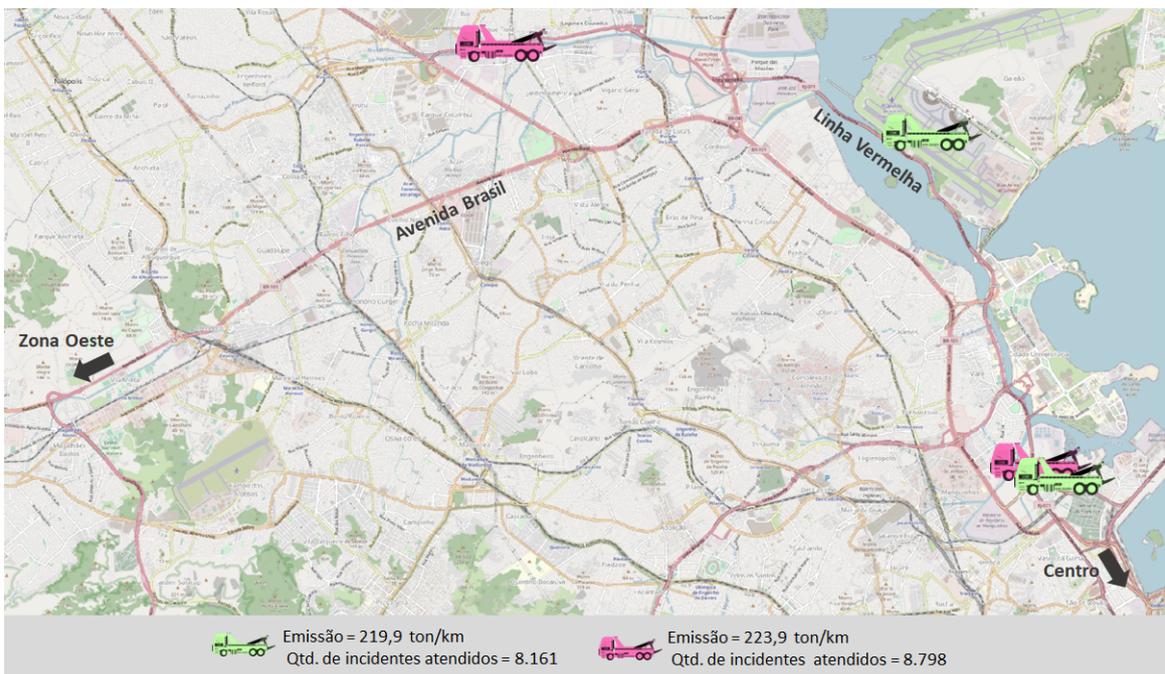


Figura 5.27: Resultado obtido para reboques leves pela manhã no Cenário 6 com o custo de R\$ 144.905,00.

reboque ao utilizar as variáveis de decisão  $x_{cld}$ ,  $x_{opd}$  e  $x_{tsd}$ . Além disso, os reboques ficam alocados próximos das seções que apresentam maiores emissões.

Como apresentado na Seção 3.2, uma operação de incidentes mais eficaz está

alinhada aos objetivos e metas da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, visto que os impactos sociais, econômicos e ambientais relacionados às ocorrências são minimizados ao realizar os atendimentos de maneira rápida, reduzindo assim a possibilidade de ocorrência de acidentes secundários, as emissões e o aumento do tempo de viagem, dentre outras coisas.

Diante dos resultados apresentados, é possível observar que o modelo matemático proposto é capaz de trazer soluções eficientes considerando o tripé da sustentabilidade. Para os gestores, o presente estudo é uma importante ferramenta para avaliar o impacto do aumento do custo com os equipamentos que realizam o atendimento a incidentes em relação à redução dos impactos negativos gerados pelas ocorrências no fluxo de tráfego. O presente estudo também apresenta uma forma de se medir o nível de serviço da operação de atendimento, além disso, é capaz de definir como o orçamento disponível para aquele ano pode ser empregado de forma a otimizar a operação. E com o modelo proposto, caberá aos gestores definir o nível de serviço esperado e qual objetivo deve ser priorizado para a alocação dos veículos de socorro.

Além disso, cabe ressaltar que as duas vias consideradas passam pelas regiões mais adensadas da cidade, como pode ser observado na Figura 5.2, e são as principais formas de ligação para o centro da cidade para quem vem das regiões com menor IDS, como demonstrado na Figura 5.3. Percebe-se assim que os impactos negativos dos incidentes afetam diretamente uma parcela significativa da população menos favorecida.

## Capítulo 6

# Conclusões e Recomendações

Os congestionamentos não recorrentes apresentam impactos significativos no desenvolvimento sustentável como redução da qualidade de vida da população urbana, problemas relativos ao aparato urbano, perda de produção, custos privados e públicos, intensificação da poluição ambiental e esgotamento dos recursos naturais. Reduzir o tempo total de incidentes em vias expressas é essencial para reduzir a deseconomia gerada por eles nas grandes cidades. Além disso, estudos mostram que um sistema de gerenciamento de incidentes é mais eficaz do que aumentar a capacidade da via, quando se pensa em reduzir os impactos gerados pelos congestionamentos. Neste cenário, os reboques têm a função essencial de restabelecer a capacidade total da via no menor tempo possível ao ficarem posicionados em locais estratégicos.

Nessa Tese de Doutorado foi proposto um modelo matemático multiobjetivo para localizar reboques, que envolve a Teoria de Filas, visando reduzir as consequências negativas produzidas pelos incidentes. Ele busca maximizar o atendimento a incidentes, minimizando, simultaneamente, as emissões de  $CO_2$  e o custo da operação, dado uma restrição orçamentária e um tempo de resposta médio máximo.

Como mencionado ao longo dos capítulos anteriores, os objetivos propostos têm um *trade-off* entre eles, uma vez que a melhoria de um pode resultar em piora do outro. Por isso, foi aplicado o conceito de Pareto para encontrar o conjunto de soluções eficientes para o problema, ou seja, seu Pareto Ótimo. O estudo de caso escolhido compreendeu a Avenida Brasil e a Linha Vermelha, principais vias expressas do Rio de Janeiro, Brasil.

A cidade do Rio de Janeiro sofre com um tráfego muito intenso de veículos em suas vias de alta capacidade, principalmente nos horários de pico. Além disso, o grande número de incidentes impacta diretamente a mobilidade urbana diária. Neste contexto, o modelo matemático proposto se revela interessante para estudar cenários alternativos para a localização dos reboques.

Para os testes computacionais, foram estudados cenários nos quais houve varia-

ção do tempo médio previsto para realizar o atendimento. Observou-se que, quanto melhor o nível de serviço esperado, isto é, quanto menor o tempo médio máximo de atendimento pretendido, maior a importância da quantidade de reboques disponíveis para aumentar o número de ocorrências atendidas. Quando o tempo médio máximo esperado de atendimento é maior, observou-se que não houveram mudanças no resultado quando o enfoque era maximizar o atendimento a incidentes ou minimizar a emissão de  $CO_2$ . Além disso, foi observado que um aumento do orçamento disponível, permite aumentar a quantidade de atendimentos.

Os resultados computacionais obtidos mostraram que o modelo matemático define a localização eficiente de reboques de atendimento a incidentes de tráfego com o enfoque nos três objetivos propostos, podendo ser utilizado na prática pelos tomadores de decisão responsáveis pelo gerenciamento de tráfego urbano. Portanto, este estudo é uma importante ferramenta para auxiliar os tomadores de decisão, responsáveis pelo gerenciamento de incidentes, no que diz respeito à concentração de esforços para melhorar a qualidade do serviço oferecido a sociedade, sendo possível: (i) garantir uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades, devido à minimização do impacto social causado pelos incidentes, como aumento do tempo de deslocamento, estresse, inalação de poluentes e outros; (ii) tornar as cidades e assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, devido à resposta mais rápida aos incidentes, o que reduz os acidentes secundários, aumentando assim a segurança no trânsito; (iii) garantir padrões sustentáveis de produção e consumo, devido à redução do congestionamento que impacta o consumo de combustível; e (iv) tomar medidas urgentes para mitigar as mudanças climáticas e seus impactos.

Como limitações da pesquisa, pode-se citar as simplificações realizadas para aplicação do modelo matemático. Primeiro quanto ao tempo para o reestabelecimento da capacidade da via. Devido a ausência de dados, considerou-se que ele é igual ao tempo de deslocamento do reboque acrescido do tempo de retirada do veículo. Além disso, o tempo de deslocamento do reboque não considerou o atraso gerado pelo incidente, portanto a sua velocidade de deslocamento não foi afetada. Por último, considerou-se que todos os incidentes afetam apenas uma faixa de rolamento da via e que uma mesma redução de velocidade foi considerada para todas as ocorrências, independente do veículo envolvido.

Como estudos futuros, sugere-se considerar no modelo matemático, além da emissão de  $CO_2$ , outros impactos gerados pelo incidentes tais como aumento do consumo de combustível e perda de produção da população afetada pelo congestionamento. Alguns autores criticam a monetização dos custos de sinistros de trânsito ([135] e [136]), principalmente quando se trata da monetização das vidas perdidas, porém o conceito de valor estatístico da vida se torna interessante afim de mensurar a im-

portância de intervenções capazes de reduzir o índice de mortalidade ([137]). Além disso, sugere-se estudar medidas para a prevenção das ocorrências, visto que, mesmo com investimentos altos em operação de socorro, o custo nunca será nulo enquanto os incidentes acontecerem.

Sugere-se também aumentar a área de estudo, abrangendo mais vias da cidade pois os centros urbanos são compostos de sistemas complexos e o gerenciamento de incidentes deve ser analisado observando todo o sistema viário.

Além disso, a presente pesquisa baseou-se em dados históricos afim de definir a localização dos equipamentos de socorro, porém ao analisá-los, foi possível observar outras questões importantes. Por exemplo, verificou-se que, em condições climáticas adversas (chuvas fortes, rajadas de vento, etc.), os incidentes geram congestionamentos não recorrentes mais impactantes para a cidade. Portanto, como estudos futuros, propõe-se aliar a otimização com ferramentas de previsibilidade, trazendo mais variáveis para o modelo. Espera-se assim melhorar a localização dos equipamentos na área urbana.

# Referências Bibliográficas

- [1] BARDAL, K., JORGENSEN, F. “Valuing the risk and social costs of road traffic accidents – Seasonal variation and the significance of delay costs”, *Transport Policy*, v. 57, pp. 10–19, 2017. doi: 10.1016/j.tranpol.2017.03.015.
- [2] JING, C., HU, D., WANG, M. X., et al. “Comparison of queue estimation accuracy by shockwave-based and input-output-based models.” *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2687–2692, 2014. doi: 10.1109/ITSC.2014.6958120.
- [3] BAI, X., ZHOU, Z., CHIN, K., et al. “Evaluating lane reservation problems by carbon emission approach”, *Transportation Research Part D*, v. 53, pp. 178–192, 2017. doi: 10.1016/j.trd.2017.04.002.
- [4] BAUZA, R., GOZALVEZ, J., SANCHEZ-SORIANO, J. “Road traffic congestion detection through cooperative Vehicle-to-Vehicle communications.” *IEEE Local Computer Network Conference*, pp. 606–612, 2010. doi: 10.1109/lcn.2010.5735780.
- [5] GROTE, M., WILLIAMS, I., PRESTON, J., et al. “Including congestion effects in urban road traffic CO2 emissions modelling: Do Local Government Authorities have the right options?” *Transportation Research Part D*, v. 43, pp. 95—106, 2016. doi: 10.1016/j.trd.2015.12.010.
- [6] PALMA, A. D., LINDSEY, R. “ITraffic congestion pricing methodologies and technologies.” *Transportation Research Part C*, v. 19, pp. 1377—1399, 2011. doi: 10.1016/j.trc.2011.02.010.
- [7] ANBAROGLU, B., HEYDECKER, B., CHENG, T. “Spatio-temporal clustering for non-recurrent traffic congestion detection on urban road networks”, *Transportation Research Part C*, v. 48, pp. 47–65, 2014. doi: 10.1016/j.trc.2014.08.002.

- [8] HOJATI, A., FERREIRA, L., WASHINGTON, S., et al. “Reprint of: Modelling the impact of traffic incidents on travel time reliability”, *Transportation Research Part C*, v. 70, pp. 86—97, 2016. doi: 10.1016/j.trc.2016.06.013.
- [9] XIAO, Y., COULOMBEL, N., PALMA, A. D. “The valuation of travel time reliability: does congestion matter?” *Transportation Research Part B*, v. 97, pp. 113—141, 2017. doi: 10.1016/j.trb.2016.12.003.
- [10] BARTH, M., BORIBOONSOMSIN, K. “Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2058, pp. 163—171, 2008. doi: 10.3141/2058-20.
- [11] CHUNG, Y., CHO, H., CHOI, K. “Impacts of freeway accidents on CO2 emissions: a case study for Orange County, California, US”, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, v. 7 (1), pp. 93—99, 2013. doi: 10.1016/j.trd.2013.06.005.
- [12] ZHANG, K., BATTERMAN, S., DION, F. “Vehicle emissions in congestion: comparison of work zone, rush hour and free-flow conditions”, *Atmospheric Environment*, v. 45, pp. 1929—1939, 2011. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.030.
- [13] SOOKUN, A., BOOJHAWON, R., RUGHOOPUTH, S. “Assessing greenhouse gas and related air pollutant emissions from road traffic counts: a case study for Mauritius”, *Transportation Research Part D*, v. 32, pp. 35—47, 2014. doi: 10.1016/j.trd.2014.06.005.
- [14] YUAN, F., CHEU, R. “Incident detection using support vector machines”, *Transportation Research Part C*, v. 11, pp. 309—328, 2003. doi: 10.1016/S0968-090X(03)00020-2.
- [15] MA, X., DING, C., LUAN, S., et al. “Prioritizing Influential Factors for Freeway Incident Clearance Time Prediction Using the Gradient Boosting Decision Trees Method”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 18, pp. 2303—2310, 2017. doi: 10.1109/TITS.2016.2635719.
- [16] JEONG, Y., CASTRO, M., HAN, M. K. J. D. “A wavelet-based freeway incident detection algorithm with adapting threshold parameters”, *Transportation Research Part C*, v. 19, pp. 1—19, 2011. doi: 10.1016/j.trc.2009.10.005.
- [17] IPCC. “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change”. 2014. Disponível em: <[https://https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/](https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/)>. Online; accessed 03 September 2020.

- [18] UN-HABITAT. *Cities and climate change: global report on human settlements – 2011*. London, UN-HABITAT, 2011. ISBN: 978-92-1-132296-5.
- [19] OECD. “Reducing transport greenhouse gas emissions – Trends and Data”. 2010. Disponível em: <<http://www.internationaltransportforum.org/Pub/pdf/10GHGTrends.pdf>>. Online; accessed 03 September 2020.
- [20] GUERRIERI, M., MAURO, R. “Capacity and safety analysis of hard-shoulder running (HRS): a motorway case study”, *Transportation Research Part A*, v. 92, pp. 162—183, 2016. doi: 10.1016/j.tra.2016.08.003.
- [21] CHEN, K., YU, L. “Microscopic Traffic-Emission Simulation and Case Study for Evaluation of Traffic Control Strategies.” *Transportation Research Part D*, v. 24, pp. 120–126, 2013. doi: 10.1016/s1570-6672(07)60011-7.
- [22] GEROLIMINIS, N., KARLAFTIS, M., SKABARDONIS, A. “A spatial queuing model for the emergency vehicle districting and location problem”, *Transportation Research Part B*, v. 43, pp. 798—811, 2009. doi: 10.1016/j.trb.2009.01.006.
- [23] OZBAY, K., IYIGUN, C., BAYKAL-GURSOY, M., et al. “Probabilistic programming models for traffic incident management operations planning”, *Annals of Operations Research*, v. 203, pp. 389—406, 2013. doi: 10.1007/s10479-012-1174-6.
- [24] LOU, Y., YIN, Y., LAWPHONGPANICH, S. “Freeway service patrol deployment planning for incident management and congestion mitigation”, *Transportation Research Part C*, v. 19, pp. 283—295, 2011. doi: 10.1016/j.trc.2010.05.014.
- [25] JABALI, O., WOENSEL, T., DE KOK, A. “Analysis of travel times and CO2 emissions in time-dependent vehicle routing”, *Production and Operations Management*, v. 21, pp. 1060—1074, 2012. doi: 10.1111/j.1937-5956.2012.01338.x.
- [26] DECC. “2012 UK Greenhouse Gas Emissions”. 2014. Disponível em: <[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/408045/2014\\_Final\\_UK\\_greenhouse\\_gas\\_emissions\\_national\\_statistics\\_1990-2012.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/408045/2014_Final_UK_greenhouse_gas_emissions_national_statistics_1990-2012.pdf)>. Online; accessed 10 December 2019.
- [27] ONU. “Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development - A/RES/70/1”. 2014. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/>>.

[//www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_70\\_1\\_E.pdf](http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf)>. Online; accessed 10 December 2019.

- [28] KUNSCH, L. P., KAVATHATZOPOULOS, I., RAUSCHMAYER, F. “Modeling complex ethical decision problems with operations research”, *Omega*, v. 37, pp. 1100–1108, 2009. doi: 10.1016/j.omega.2008.11.006.
- [29] BRANS, J. P., KUNSCH, P. L. “Ethics in operations research and sustainable development.” *International Transactions in Operational Research*, v. 17, pp. 427–444, 2010. doi: 10.1111/j.1475-3995.2009.00728.x.
- [30] WHITE, L., LEE, G. J. “Operational research and sustainable development: Tackling the social dimension.” *European Journal of Operational Research*, v. 193 (3), pp. 683—692, 2009. doi: 10.1016/j.ejor.2007.06.057.
- [31] KELLY, K. “A systems approach to identifying decisive information for sustainable development”, *European Journal of Operational Research*, v. 109, pp. 452—464, 1998. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00070-8.
- [32] FARAHANI, R. Z., STEADIESEIFI, M., ASGARI, N. “Multiple criteria facility location problems: A survey”, *Applied Mathematical Modelling*, v. 34(7), pp. 1689—1709, 2010. doi: 10.1016/j.apm.2009.10.005.
- [33] KING, D., INDERWILDI, O., CAREY, C., et al. “Future of Mobility Roadmap – Ways to Reduce Emissions While Keeping Mobile”. 2010. Smith School of Enterprise and the Environment, Oxford, UK.
- [34] TIWARY, A., CHATTERTON, T., NAMDEO, A. “Co-managing carbon and air quality: pros and cons of local sustainability initiatives.” *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 57(8), pp. 1266—1283, 2013. doi: 10.1080/09640568.2013.802677.
- [35] BECERRA, R., COELLO, C. “Solving Hard Multiobjective Optimization Problems Using E-Constraint with Cultured Differential Evolution”. In: *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IX*, v. 4193, cap. 55, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006.
- [36] MAVROTAS, G. “Effective implementation of the E-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems”, *Applied Mathematics and Computation*, v. 213(2), pp. 455—465, 2009. doi: 10.1016/j.amc.2009.03.037.

- [37] ARENALES, M., ARMENTANO, V., MORÁBITO, R., et al. . *Pesquisa Operacional*. São Paulo, Elsevier, 2007.
- [38] LOBATO, F. S. *Multi-objective optimization for engineering system design*. Tese de D.Sc., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2008.
- [39] HAJIPOUR, V., PASANDIDEH, S. “A New Multi-Objective Facility Location Model within Batch Arrival Queuing Framework”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 78, pp. 1665–1673, 2011.
- [40] PASANDIDEH, S. H. R., NIAKI, S. T. A. “Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 23(3), pp. 651–659, 2012. doi: 10.1007/s10845-010-0416-1.
- [41] FOGLIATTI, M., MATTOS, N. *Teoria de filas*, v. 1, 1. 1 ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 2007. ISBN 8571931577.
- [42] WANG, Q., BATTÀ, R., RUMP, C. “Algorithms for a Facility Location Problem with Stochastic Customer Demand and Immobile Servers”, *Annals of Operations Research*, v. 111, pp. 17–34, 2002.
- [43] COLLETTE, Y., SIARRY, P. *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies*. Berlin, Springer, 2004. ISBN: 978-3-662-08883-8.
- [44] DEB, K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. 1 ed. New York, Springer, 2001.
- [45] TRB. *Highway Capacity Manual*, v. 1. 5 ed. Washington D. C., Transportation Research Board, 2010. ISBN: 9780309160773.
- [46] FHWA. “Traffic incident management handbook”. 2010. Disponível em: <[https://ops.fhwa.dot.gov/eto\\_tim\\_pse/publications/timhandbook/](https://ops.fhwa.dot.gov/eto_tim_pse/publications/timhandbook/)>. Online; accessed 10 December 2019.
- [47] CHIMBA, D., KUTELA, B., OGLETREE, G., et al. “Impact of Abandoned and Disabled Vehicles on Freeway”, *Journal of Transportation Engineering*, v. 140(3), pp. 04013013–1 – 04013013–8, 2014. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000635.
- [48] HAULE, H., SANDO, T., LENTZ, R., et al. “Evaluating the impact and clearance duration of freeway incidents”, *International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 8, pp. 13—24, 2019. doi: 10.1016/j.ijtst.2018.06.005.

- [49] HOU, L., LAO, Y., WANG, Y., et al. “Time-varying effects of influential factors on incident clearance time using a non-proportional hazard-based model”, *Transportation Research Part A*, v. 63, pp. 12—24, 2014. doi: 10.1016/j.tra.2014.02.014.
- [50] ZOU, Y., YE, X., HENRICKSON, K., et al. “Jointly analyzing freeway traffic incident clearance and response time using a copula-based approach”, *Transportation Research Part C*, v. 86, pp. 221–234, 2006. doi: 10.1016/j.trc.2017.11.004.
- [51] STEENBRUGGEN, J., BORZACCHIELLO, M., NIJKAMP, P., et al. “Data from telecommunication networks for incident management: An exploratory review on transport safety and security”, *Transport Policy*, v. 28, pp. 86—102, 2013. doi: 10.1016/j.tranpol.2012.08.006.
- [52] LI, P., WALTON, J. “Evaluating Freeway Service Patrols in Low-Traffic Areas”, *Journal Of Transportation Engineering*, v. 139, pp. 1095–1104, 2013. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000595.
- [53] ONU. “74/299. Improving global road safety, Resolution adopted by the General Assembly on 31 August 2020”. 2020. <https://undocs.org/en/A/RES/74/299>.
- [54] MAES, A., HOINASKI, L., MEIRELLES, T., et al. “A methodology for high resolution vehicular emissions inventories in metropolitan areas: Evaluating the effect of automotive technologies improvement”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 77, pp. 303–319, 2019. doi: 10.1016/j.trd.2019.10.007.
- [55] BRENT, D., BELAND, L. P. “Traffic congestion, transportation policies, and the performance of first responders.” *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 102339, 2020. doi: 10.1016/j.jeem.2020.102339.
- [56] SALUM, J., KITALI, A., SANDO, T., et al. “Evaluating the impact of Road Rangers in preventing secondary crashes”, *Accident Analysis and Prevention*, v. 156, pp. 106129, 2021. doi: 10.1016/j.aap.2021.106129.
- [57] WHO. “Global status report on road safety 2018”. 2018. [Phttps://www.who.int/publications-detail/global-status-report-on-road-safety-2018](https://www.who.int/publications-detail/global-status-report-on-road-safety-2018).
- [58] OMS. “Relatório global sobre o estado da segurança viária 2015”. 2015. ["https://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/Summary\\_GSRRS2015\\_POR.pdf](https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/Summary_GSRRS2015_POR.pdf).

- [59] SANCHEZ-MANGAS, R., GARCIA-FERRER, A., DE JUAN, A., et al. “The probability of death in road traffic accidents. How important is a quick medical response?” *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, n. 4, pp. 1048–1056, 2010. doi: 10.1016/j.aap.2009.12.012.
- [60] HAAS, K. “Benefits of traffic incident management”. 2006. National Traffic Incident Management Coalition.
- [61] REQUIA, W. J., HIGGINS, C. D., ADAMS, M. D., et al. “The health impacts of weekday traffic: A health risk assessment of PM 2.5 emissions during congested periods”, *Environment International*, v. 111, pp. 164–176, 2018. doi: 10.1016/j.envint.2017.11.025.
- [62] NOLAND, R. B., SMALL, K. A., P.KOSKENOJA, et al. “Simulating Travel Reliability”, *Regional Science and Urban Economics*, v. 28(5), pp. 535–564, 1998. doi: 10.1016/S0166-0462(98)00009-X.
- [63] KABIT, M., CHARLES, P., FERREIRA, L., et al. “Modelling major traffic incident impacts and estimation of their associated costs”, *Transportation Planning and Technology*, v. 37(4), pp. 373–390, 2014. doi: 10.1080/03081060.2014.897130.
- [64] HAULE, J. H., ALLURI, P., SANDO, T., et al. “Investigating the Impact of Rain on Crash-Clearance Duration”, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, v. 146 (11), pp. 04020130, 2020. doi: 10.1061/jtepbs.0000458.
- [65] SHAFIEI, S., MIHAITA, A., NGUYEN, H., et al. “Integrating data-driven and simulation models to predict traffic state affected by road incidents”, *The International Journal of Transportation Research*, 2021. doi: 10.1080/19427867.2021.1916284.
- [66] HSIEH, C. H., FENG, C. M. “The Highway Resilience and Vulnerability in Taiwan”, *Transport Policy*, v. 87, pp. 1–9, 2018. doi: 10.1016/j.tranpol.2018.08.010.
- [67] REINER, M., MCELVANEY, L. “Foundational infrastructure framework for city resilience”, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, v. 2, n. 1, pp. 1–7, 2017. doi: 10.1080/23789689.2017.1278994.
- [68] GUIDOTTI, R., CHMIELEWSKI, H., UNNIKRISSHANN, V., et al. “Modeling the resilience of critical infrastructure: the role of network dependencies”, *Sustainable and Resilient Infrastructure*, v. 1, n. 3-4, pp. 153–168, 2016. doi: 10.1080/23789689.2016.1254999.

- [69] BALAL, E., VALDEZ, G., MIRAMONTES, J., et al. “Comparative evaluation of measures for urban highway network resilience due to traffic incidents”, *International Journal of Transportation Science and Technology*, v. 8(3), pp. 304–317, 2019. doi: 10.1016/j.ijtst.2019.05.001.
- [70] GENG, B., BAO, H., LIANG, Y. “A study of the effect of a high-speed rail station on spatial variations in housing price based on the hedonic model”, *Habitat International*, v. 49, pp. 333–339, 2015. doi: 10.1016/j.habitatint.2015.06.005.
- [71] MA, X., ZHANG, J., DING, C., et al. “A geographically and temporally weighted regression model to explore the spatiotemporal influence of built environment on transit ridership”, *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 70, pp. 113–124, 2018. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.001.
- [72] JAKOB, A., CRAIG, J., FISHER, G. “Transport cost analysis: a case study of the total costs of private and public transport in Auckland”, *Environmental Science & Policy*, v. 9(1), pp. 55–66, 2006. doi: 10.1016/j.envsci.2005.09.001.
- [73] WIT, M., METHORST, R. “Kosten verkeersongevallen in Nederland: Ministerie van Infrastructuur en Milieu Directoraat-generaal Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Delft”. 2012. <https://puc.overheid.nl>.
- [74] LIMA, R. R. A. “Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras: relatório executivo”. 2003. Brasília: IPEA.
- [75] IPEA. “Estimativa dos custos dos acidentes de trânsito no Brasil com base na atualização simplificada das pesquisas anteriores do ipea”. 2015. Brasília: IPEA.
- [76] AVETISYAN, H., MILLER-HOOKS, E., MELANTA, S., et al. “Effects of vehicle technologies, traffic volume changes, incidents and work zones on greenhouse gas emissions production”, *Transportation Research Part D*, v. 26, pp. 10–19, 2014. doi: 10.1016/j.trd.2013.10.005.
- [77] JOO, S., OH, C., LEE, S., et al. “Assessing the impact of traffic crashes on near freeway air quality”, *Transportation Research Part D*, v. 57, pp. 64–73, 2017. doi: 10.1016/j.trd.2017.09.013.

- [78] CMEM. “National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) and U.S. Environmental Protection Agency (EPA)”. 1996. Disponível em: <<https://www.cert.ucr.edu/cmeme>>. Online; accessed 20 December 2019.
- [79] LIN, J., YU, D. “Traffic-related air quality assessment for open road tolling highway facility”, *Journal of environmental management*, v. 88, n. 4, pp. 962—969, September 2008. ISSN: 0301-4797. doi: 10.1016/j.jenvman.2007.05.005.
- [80] CALPUFF MODELING SYSTEM. “U.S. Environmental Protection Agency (EPA)”. 2008. Disponível em: <[https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/calpuff/Previous{}\\_SCRAM{}\\_CALPUFF{}\\_Posting{}\\_Reference.pdf](https://www3.epa.gov/ttn/scram/7thconf/calpuff/Previous{}_SCRAM{}_CALPUFF{}_Posting{}_Reference.pdf)>. Online; accessed 20 December 2019.
- [81] MAGAÑA, V. C., MUÑOZ-ORGANERO, M. “WATI: Warning of Traffic Incidents for Fuel Saving”, *Mobile Information Systems*, p. 1–16, 2016. doi: 10.1155/2016/3091516.
- [82] DIA, H., GONDWE, W. “Evaluation of Incident Impacts on Integrated Motorway and Arterial Networks Using Traffic Simulation”, *31st Australasian Transport Research Forum*, 2008.
- [83] RIEDEL, N., LOERBROKS, A., BOLTE, G., et al. “Do perceived job insecurity and annoyance due to air and noise pollution predict incident self-rated poor health? A prospective analysis of independent and joint associations using a German national representative cohort study”, *BMJ Open*, v. 7, n. 1, pp. e012815, 2017. doi: 10.1136/bmjopen-2016-012815.
- [84] HICKMAN, J. “Methodology for calculating transport emissions and energy consumption”. 1999. Disponível em: <<https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/meet.pdf>>. Online; accessed 10 December 2019.
- [85] SMIT, R., POELMAN, M., SCHRIJVER, J. “Improved road traffic emission inventories by adding mean speed distributions”, *Atmospheric Environment*, v. 42, pp. 916—926, 2008. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.026.
- [86] ABOU-SENNA, H., RADWAN, E. “VISSIM/MOVES integration to investigate the effect of major key parameters on CO2 emissions”, *Transportation Research Part D*, v. 21, pp. 39–46, 2013. doi: 10.1016/j.trd.2013.02.003.

- [87] BLIEMER, M., VERSTEEGT, H., CASTENMILLER, R. “INDY: a new analytical multiclass dynamic traffic assignment model”. 2004. In: TRISTAN V Conference Proceedings, Guadeloupe, France.
- [88] NTZIACHRISTOS, L., GKATZOFLIAS, D., KOURIDIS, C., et al. “COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model”, *Information Technologies in Environmental Engineering*, pp. 491 – 504, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-88351-7\_37.
- [89] SMIT, R., SMOKERS, R., RABÉ, E. “A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+”, *Transportation Research Part D*, v. 12, pp. 414—422, 2007. doi: 10.1016/j.trd.2007.05.001.
- [90] HAQUE, M., CHIN, H., DEBNATH, A. “Sustainable, safe, smart—three key elements of Singapore’s evolving transport policies”, *Transport Policy*, v. 27, pp. 20–31, 2013. doi: 10.1016/j.tranpol.2012.11.017.
- [91] WELLE, B., SHARPIN, A. B., ADRIAZOLA-STEIL, C., et al. “Sustentável e Seguro. Visão e Diretrizes para Zerar as Mortes no Trânsito (Sustainable and Safe. Vision and Guidelines for Zero Traffic Deaths)”. 2018. Disponível em: <[https://wribrasil.org.br/sites/default/files/Sustentavel\\_Seguro.pdf](https://wribrasil.org.br/sites/default/files/Sustentavel_Seguro.pdf)>. Online; accessed 20 December 2019.
- [92] KHURSHID, A., SOHAIL, A., KHURSHID, M., et al. “Analysis of Road Traffic Accident Fatalities in Karachi, Pakistan: An Autopsy-Based Study”, *Cureus*, v. 13, n. 4, pp. e14459, 2021. doi: 10.7759/cureus.14459.
- [93] ROSSI, I. A., VIENNEAU, D., RAGETTLI, M. S., et al. “Estimating the health benefits associated with a speed limit reduction to thirty kilometres per hour: A health impact assessment of noise and road traffic crashes for the Swiss city of Lausanne”, *Environment International*, v. 145, pp. 106126, 2020. doi: 10.1016/j.envint.2020.106126.
- [94] CHAND, S., MOYLAN, E., WALLER, S., et al. “Analysis of Vehicle Breakdown Frequency: A Case Study of New South Wales, Australia”, *Sustainability*, v. 12(19), pp. 8244, 2020. doi: 10.3390/su12198244.
- [95] FRIEDMAN, J., HENDRIX, V., FUSTOK, J., et al. “Correlation of ride sharing service availability and decreased alcohol-related motor vehicle collision incidence and fatality”, *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, v. 89, n. 3, pp. 441–447, 2020. doi: 10.1097/ta.0000000000002802.

- [96] VAROTTO, S., JANSEN, R., BIJLEVELD, F. “Adaptations in driver deceleration behaviour with automatic incident detection: A naturalistic driving study”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 78, pp. 164–179, 2021. doi: 10.1016/j.trf.2021.02.011.
- [97] CHEN, Y., GOMEZ, A., FRAME, G. “Achieving energy savings by intelligent transportation systems investments in the context of smart cities”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 54, pp. 381–396, 2017. doi: 10.1016/j.trd.2017.06.008.
- [98] BASSO, F., CIFUENTES, A., PEZOA, R., et al. “A vehicle-by-vehicle approach to assess the impact of variable message signs on driving behavior”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 125, pp. 103015, 2021. doi: 10.1016/j.trc.2021.103015.
- [99] ZHU, S., KIM, W., CHANG, G., et al. “Design and Evaluation of Operational Strategies for Deploying Emergency Response Teams: Dispatching or Patrolling”, *Journal of Transportation Engineering*, v. 140, pp. 04014021, 2018. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000670.
- [100] ADLER, N., HAKKERT, A., KORNBLUTH, J., et al. “Location-allocation models for traffic police patrol vehicles on an interurban network”, *Annals of Operations Research*, v. 221, pp. 9–31, 2014. doi: 10.1007/s10479-012-1275-2.
- [101] BALTAR, M., ABREU, V., RIBEIRO, G., et al. “Multi-objective model for the problem of locating tows for incident servicing on expressways”, *TOP*, pp. 58–77, 2021. doi: 10.1007/s11750-020-00567-w.
- [102] BALTAR, M., ABREU, V., RIBEIRO, G., et al. “Evaluating impacts of traffic incidents on CO2 emissions in express roads”. In: *LCA Based Carbon Footprint Assessment*, 1 ed., cap. 2, Hong Kong, Springer, 2021.
- [103] FRANCIS, L., JR, L. M., WHITE, J. *Facility layout and location: an analytical approach*. 2 ed. New Delhi, Pearson Education, 1999.
- [104] CHUNG, K., TCHA, D. “A fuzzy set-theoretic method for public facility location”, *European Journal of Operational Research*, v. 58(1), pp. 9–98, 1992. doi: 10.1016/0377-2217(92)90238-5.
- [105] YIN, Y. “Optimal Fleet Allocation of Freeway Service Patrols”, *Networks and Spatial Economics*, v. 6, pp. 221—234, 2006. doi: 10.1007/s11067-006-9281-z.

- [106] PAL, R., BOSE, I. “An optimization based approach for deployment of roadway incident response vehicles with reliability constraints”, *European Journal of Operational Research*, v. 198, pp. 452—463, 2009. doi: 10.1016/j.ejor.2008.09.010.
- [107] AKDOGAN, M., BAYINDIR, Z., IYIGUN, C. “Location analysis of emergency vehicles using an approximate queueing model”, *Transportation Research Procedia*, v. 22, pp. 430–439, 2017. doi: 10.1016/j.trpro.2017.03.018.
- [108] BALTAR, M., RIBEIRO, G., BAHIENSE, L., et al. “Mathematical modeling of tow truck location considering traffic congestion queue”, *Pesquisa Operacional*, pp. 1–28, 2021. doi: 10.1590/0101-7438.2021.041.00249119.
- [109] BALTAR, M., RIBEIRO, G., SANTOS, R. F. “Exploratory analysis of incidents in an urban area focused on broken-down vehicles: The case of Rio de Janeiro”, *Case Studies on Transport Policy*, pp. 723–731, 2022. doi: 10.1016/j.cstp.2022.01.033.
- [110] BALTAR, M., ABREU, V., RIBEIRO, G., et al. “Um modelo de minimização de emissão de CO2 para o problema de localização de reboques que realizam atendimentos a incidentes em vias expressas”. 2020. 34<sup>o</sup> Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET.
- [111] BHATTACHARYA, R., BANDYOPADHYAY, S. “Solving conflicting bi-objective facility location problem by NSGA II evolutionary algorithm”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 51, pp. 397—414, 2010. doi: 10.1007/s00170-010-2622-6.
- [112] REVELLE, C., MARKS, D., LIEDMAN, J. “An Analysis of Private and Public Sector Location Models”, *Management Science*, v. 16, n. 11, pp. 692–707, 1970.
- [113] KOSTER, P., RIETVELD, P. “Optimising Incident Management on the Road”, *Journal of Transport Economics and Policy*, v. 45(1), pp. 63–81, 2011.
- [114] SMIT, R., BROWN, A. L., CHAN, Y. C. “Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow?” *Environmental Modelling and Software*, v. 23, n. 10-11, pp. 1262—1270, 2008. doi: 10.1016/j.envsoft.2008.03.001.
- [115] SHIRI, S., HUYNH, N. “Assessment of U.S. chassis supply models on drayage productivity and air emissions”, *Transportation Research Part D*, v. 61, pp. 174–203, 2018. doi: 10.1016/j.trd.2017.04.024.

- [116] COSTA, P., MAUCERI, S., CARROLL, P., et al. “A Genetic Algorithm for a Green Vehicle Routing Problem”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, v. 64, pp. 2, 2018. doi: 10.1016/j.endm.2018.01.008.
- [117] AMER, H., FAROUK, H., EL-KILANY, K. “Heterogeneous Green Vehicle Routing Problem with Hierarchical Objectives: Case Study”. 2020. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dubai, UAE.
- [118] ABDELLI, I., ABDELMALEK, F., DJELLOUL, A., et al. “GIS-based approach for optimised collection of household waste in Mostaganem city (Western Algeria)”, *Waste Management and Research*, v. 1, pp. 1–10, 2016. doi: 10.1177/0734242X16633519.
- [119] CHAIKAEW, P. “Route Optimization of MSW Collection and Transport Using a GIS-Based Analysis on the Tourism Island”, *Sustainability in Environment*, v. 3 (2), pp. 197–206, 2018. doi: 10.22158/se.v3n3p197.
- [120] TANGUY, A., GLAUS, M., LAFOREST, V., et al. “A spatial analysis of hierarchical waste transport structures under growing demand”, *Waste Management and Research*, v. 1, pp. 1–10, 2016. doi: 10.1177/0734242X16658544.
- [121] CHIARA, G., CHEAH, L., AZEVEDO, C., et al. “A Policy-Sensitive Model of Parking Choice for Commercial Vehicles in Urban Areas”, *Transportation Science*, v. 1, pp. 1–25, 2020. doi: 10.1287/trsc.2019.0970.
- [122] SOBREIRA, L. T. P., CUNTO, F. J. C. “Análise exploratória espacial de atropelamentos em zonas de tráfego em Fortaleza”. In: *Anais do 31<sup>o</sup> Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, v. 1, pp. 1–12, Recife, 2017. ANPET.
- [123] KARAGANIS, A., MIMIS, A. *A Spatial Point Process for Estimating the Probability of Occurrence of a Traffic Accident*. Ersa conference papers, European Regional Science Association, 2006. Disponível em: <<https://EconPapers.repec.org/RePEc:wiiw:ersa06p640>>.
- [124] ICMBIO. “Parque nacional da Tijuca”. 2018. Disponível em: <<http://www.parquedatijuca.com.br/>>.
- [125] TOMTOM. “Traffic Index of 2019”. 2019. Disponível em: <[https://www.tomtom.com/en\\_gb/traffic-index/ranking/](https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/)>.

- [126] PDTU 2014. “Plano Diretor de Transporte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, Secretaria de Estado de Transportes do Rio de Janeiro”. 2014. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/5333332/4139325/25PDTUGovEstado092014.pdf>>. Online; Acessado em novembro de 2018.
- [127] IBGE. “Censo Demográfico de 2010”. 2010. <http://www.ibge.gov.br/home/>.
- [128] IPP. “Índice de Desenvolvimento Social (IDS) por Áreas de Planejamento (AP), Regiões de Planejamento (RP), Regiões Administrativas (RA), Bairros e Favelas do Município do Rio de Janeiro”. 2010. Rio de Janeiro.
- [129] VEJA, R. “Crise do diesel: governo pede trégua”. 2018. <https://veja.abril.com.br/videos/giro-veja/crise-do-diesel-governo-pede-tregua-a-caminhoneiros/>.
- [130] BOUYAHIA, Z., HADDAD, H., JABEUR, N., et al. “A two-stage road traffic congestion prediction and resource dispatching toward a self-organizing traffic control system”, *Personal and Ubiquitous Computing*, v. 23, pp. 909–920, 2019.
- [131] CHOU, C., MILLER-HOOKS, E. “A Time-Saving Approach to Simulation Modeling for Traffic Incident Management Program Evaluation”, *Journal of the Transportation Research Forum*, v. 48, pp. 97–118, 2009.
- [132] FHWA. “Incident Characteristics and impact on freeway traffic”. 2004. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b096/fe91a1c9a3e89e0449ca0c3ed6b7b6276ded.pdf>>. Online; accessed 10 December 2019.
- [133] PREFEITURA RIO. “PREGÃO ELETRÔNICO PE - CET-Rio N° 0054/2018”. 2017. <http://www.comprasgovernamentais.gov.br>.
- [134] HAIMES, Y. “On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization”, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, v. 1, pp. 296—297, 1971. doi: 10.1109/TSMC.1971.4308298.
- [135] MOHAN, D. “Social Cost of Road Traffic Crashes in India”. In: *Proceedings First Safe Community Conference on Cost of Injury*, v. 1, pp. 33–38. Viborg: Safe Community Conference on Cost of Injury, 2002.

- [136] HAUER, E. “Can one estimate the value of life or is it better to be dead than stuck in traffic?” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 28A(2), pp. 109–118, 1994. doi: [https://10.1016/0965-8564\(94\)90032-9](https://10.1016/0965-8564(94)90032-9).
- [137] IPEA. “Impactos socioeconomicos dos acidentes de transporte no Brasil no período de 2007 a 2018”. 2020. <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/notatecnica>.