VINÍCIUS BRANDÃO PIETRANTONIO

**Análise dos impactos de intervenções em corredores de
transporte público por ônibus considerando as emissões
de poluentes atmosféricos e seus impactos diretos**

**São Paulo
2021**

VINÍCIUS BRANDÃO PIETRANTONIO

**Análise dos impactos de intervenções em corredores de
transporte público por ônibus considerando as emissões
de poluentes atmosféricos e seus impactos diretos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

**São Paulo
2021**

VINÍCIUS BRANDÃO PIETRANTONIO

**Análise dos impactos de intervenções em corredores de
transporte público por ônibus considerando as emissões
de poluentes atmosféricos e seus impactos diretos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Transportes

Orientador: Prof. Dr. Orlando Strambi

**São Paulo
2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pietrantonio, Vinicius Brandão

Análise dos impactos de intervenções em corredores de transporte público por ônibus considerando as emissões de poluentes atmosféricos e seus impactos diretos / V. B. Pietrantonio -- versão corr. -- São Paulo, 2021. 294 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Engenharia de Transportes 2. Economia de Transportes 3. Transporte Urbano 4. Transporte Coletivo 5. Sustentabilidade I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha parceira, Renata, pelo dia-a-dia e pelas coisas compartilhadas e construídas juntos – dentre as quais, essa Dissertação, que representa uma fração das coisas que vivemos nos últimos anos. Obrigado por ter sido, e ser, minha maior fonte de inspiração.

A meu orientador durante o Mestrado e mestre desde a graduação, Orlando, meu agradecimento por se dispor a compartilhar comigo seu brilhantismo e sua experiência durante essa longa jornada. É uma honra ter tido essa oportunidade.

Adiciono um agradecimento especial, após a realização da defesa da dissertação e da arguição subsequente, aos professores Eduardo Haddad e Felipe Loureiro, pela disposição em participar da banca e em dedicar sua disputada atenção ao conteúdo desta pesquisa e, sobretudo, pelas diversas críticas à pesquisa, tão pertinentes e estimulantes.

Agradeço ao Estado de São Paulo pelo investimento contínuo em educação e no desenvolvimento científico e tecnológico, tão imprescindível para que sejamos capazes de mudar, progressivamente e positivamente, a realidade de nossa sociedade.

Agradeço aos companheiros de trabalho com quem tive o prazer de interagir, discutir e aprender tanto, em tantos momentos. O poder de impacto e de evolução que se cria nessas ocasiões não é comparável ao que eu seria capaz de alcançar em uma vida inteira, sozinho.

A meus familiares e amigos queridos, meu agradecimento por fazerem dos momentos difíceis, superáveis, e por tornarem cada experiência especialmente mais rica. É inestimável tê-los por perto.

Por fim, e acima de tudo, gostaria de agradecer meus pais, Lúcia e Hugo, pelos ensinamentos diários e pelo apoio que me dão durante toda a vida. Agradeço pelos valores que vocês me transmitiram, sem pouparem esforços, e que me guiarão ao longo de qualquer caminho que eu me propuser a trilhar.

*“Development has caused climate change, but development is also
what’s going to get us through it.”
(Autor desconhecido)*

RESUMO

A pesquisa investigou a relevância dos impactos econômicos das emissões veiculares de poluentes atmosféricos (EVP) e seus efeitos no âmbito da avaliação econômica de projetos em sistemas de transporte urbano. O escopo da pesquisa abrangeu duas componentes associadas à questão. Primeiramente, endereçou a especificação de métodos para avaliação de projetos de transporte urbano dedicados a avaliar intervenções sobre a operação dos sistemas de transportes e seus impactos associados às EVP e seus efeitos. Adicionalmente, a pesquisa envolveu uma avaliação genérica do potencial impacto de intervenções de naturezas variadas para fins de redução de EVP e as externalidades associadas, a saber: (i) intervenções de infraestrutura; (ii) intervenções operacionais; (iii) intervenções de mercado (política de preços) e (iv) intervenções tecnológicas. Foi possível identificar que os resultados produzidos pelos métodos de avaliação são significativamente sensíveis a aspectos como: (a) a representação operacional do sistema de transportes; (b) o grau de congestionamento incidente sobre o contexto de análise; (c) a avaliação explícita de períodos de menor carregamento, e; (d) a valoração atribuída aos efeitos finais das EVP. De modo geral, a migração modal em favor do transporte coletivo por ônibus (TCO) se mostrou como instrumento efetivo para a obtenção de benefícios sociais – inclusive no que diz respeito à mitigação dos impactos das EVP. Consequentemente, intervenções de Engenharia visando promover ganhos de eficiência operacional no TCO se mostraram como soluções com elevado potencial de efetividade. Adicionalmente, a eletrificação da frota do TCO mostrou-se uma medida com potencial para reduzir custos operacionais do sistema, além de naturalmente apresentar elevado potencial de redução dos impactos das EVP. Os resultados centrais indicam que as intervenções avaliadas, quando implementadas isoladamente e apenas sobre avenidas no Município de São Paulo contendo corredores com faixas exclusivas de ônibus, podem proporcionar ganhos de Bem Estar Social entre R\$ 106 milhões e R\$ 427 milhões por ano – dentre os quais, os impactos associados às EVP podem representar até R\$ 90 milhões/ano.

Palavras-chave: Corredor de ônibus. BRT. Emissões veiculares de poluentes do ar. Avaliação de projetos no transporte urbano. Externalidades no transporte rodoviário.

ABSTRACT

This research investigated the relevance of vehicular air pollutant emissions (EVP) economic impacts for project appraisal purposes in urban transport systems. The research scope covered two components related to this matter. Firstly, it addressed the specification of methods for evaluating transport projects focused on transport systems operations and its impacts in terms of EVP and associated effects. Additionally, the research involved a generic assessment of different intervention typologies aimed at reducing EVP and associated externalities, namely: (i) infrastructure interventions; (ii) operational interventions; (iii) market interventions (pricing policies) and (iv) technological interventions. It was possible to identify that results of evaluation methods are significantly sensitive to aspects such as: (a) the transport system operational representation; (b) the congestion level on the analyzed scenario; (c) the explicit assessment of day periods with lower demand levels, and; (d) the valuation attributed to pollutant emissions effects. In general, modal shift towards bus transit (TCO) has shown to be an effective instrument for achieving social benefits – including those related to EVP impacts mitigation. As consequence, Engineering interventions aimed at promoting operational efficiency in TCO have demonstrated high effectiveness potential. Additionally, bus fleet electrification showed to be a measure with potential for reducing transit operating costs – in addition to its natural effectiveness in mitigating EVP-related impacts. Results indicates that the evaluated interventions, when implemented alone and considering only avenues containing corridors with exclusive bus lanes within the city of São Paulo, can promote Social Welfare gains raging from R\$ 106 million to R\$ 427 million per year – among which EVP-related impacts can represent up to R\$ 90 million/year.

Keywords: Bus corridors. BRT. Air pollution. Vehicle pollutant emissions. Urban transport projects appraisal. Road traffic externalities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo genérico de perfil de carregamento de serviço de TCO	43
Figura 2.2: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (sem faixa de ultrapassagem, em 2017).....	52
Figura 2.3: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (com faixa de ultrapassagem, em 2018).....	52
Figura 3.1: Caracterização genérica do sistema de transporte urbano	70
Figura 3.2: Relação entre AGWP e GWP para o CH ₄	86
Figura 3.3: Contribuição do tráfego para a concentração de poluentes a diferentes distâncias do eixo da via	93
Figura 4.1: Alinhamento do Corredor Campo Limpo-Rebouças.....	118
Figura 4.2: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (sem faixa de ultrapassagem).....	118
Figura 4.3: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (com faixa de ultrapassagem).....	119
Figura 4.4: Principais dimensões do modelo e representação esquemática de seu encadeamento.....	122
Figura 4.5: Esquema representativo do processo decisório dos usuários	138
Figura 4.6: Contribuição do tráfego para a concentração de poluentes a diferentes distâncias do eixo da via	147
Figura 4.7: Temas abordados no presente item, dentre as principais dimensões do modelo	151
Figura 5.1: Principais indicadores – Exploração introdutória.....	169
Figura 5.2: Principais indicadores – Exploração introdutória (complemento).....	170
Figura 5.3: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Exploração Introdutória	170

Figura 5.4: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “Base + CC/S”	172
Figura 5.5: Custos sociais médios no Pico – Exploração introdutória	174
Figura 5.6: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Exploração introdutória	175
Figura 5.7: Custos sociais médios no Fora-Pico – Exploração introdutória	176
Figura 5.8: Principais resultados – Diferentes tipologias de intervenção	179
Figura 5.9: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Diferentes tipologias de intervenção	179
Figura 5.10: Custos sociais médios no Pico – Diferentes tipologias de intervenção	181
Figura 5.11: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Diferentes tipologias de intervenção	182
Figura 5.12: Custos sociais médios no Fora-Pico – Diferentes tipologias de intervenção	182
Figura 5.13: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “FU(p)”	183
Figura 5.14: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “FU(p+o)”	185
Figura 5.15: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “AP”	186
Figura 5.16: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “OE”	187
Figura 5.17: Principais indicadores – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado.....	189
Figura 5.18: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado	190
Figura 5.19: Custos sociais médios no Pico – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado.....	191

Figura 5.20: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado.....	192
Figura 5.21: Custos sociais médios no Fora-Pico – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado	192
Figura 5.22: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “FU+CC/S”	193
Figura 5.23: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “AP+CC/S”	194
Figura 5.24: Principais indicadores – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções	197
Figura 5.25: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções	197
Figura 5.26: Custos sociais médios no Pico – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções	199
Figura 5.27: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções	199
Figura 5.28: Custos sociais médios no Fora-Pico – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções	200
Figura 5.29: Razão entre parcelas do Bem Estar associadas às EVP e não associadas às EVP	206
Figura 5.30: Correlação entre parcelas do Bem Estar associadas às EVP e não associadas às EVP	208
Figura 5.31: Correlação entre parcelas do Bem Estar associadas às EVP e não associadas às EVP (expurgando cenários que consideram eletrificação da frota) ..	208
Figura 5.32: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento	213
Figura 5.33: Custos sociais médios no Fora-Pico – Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento	214

Figura 5.34: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento	217
Figura 5.35: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento	217
Figura 5.36: Custos sociais médios no Pico – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento.....	219
Figura 5.37: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento	219
Figura 5.38: Custos sociais médios no Fora-Pico – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento	220
Figura 5.39: Principais resultados – Diferentes tipologias de intervenção (com valores-base para efeitos finais das EVP)	226
Figura 5.40: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP	226
Figura 5.41: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Diferentes tipologias de intervenções (com valores-base para efeitos finais das EVP).....	227
Figura 5.42: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP.....	227
Figura 5.43: Custos sociais médios no Pico – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP	229
Figura 5.44: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP	229
Figura 5.45: Custos sociais médios no Fora-Pico – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP	230
Figura 0.1: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (sem faixa de ultrapassagem, em 2017)	256
Figura 0.2: Densidade de ocupantes nas zonas lindeiras ao corredor Rebouças ..	284

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Modelos para Inventário de Emissões Veiculares de Poluentes	80
Tabela 3.2: Modelos de Emissões Veiculares Instantâneas de Poluentes	81
Tabela 3.3: Custos estimados associados ao impacto climático da emissão de 1 tonelada de dióxido de carbono	87
Tabela 3.4: Valores-referência de Risco Relativo (RR) para mortalidade (todas as causas; todas as idades) associados aos principais poluentes.....	99
Tabela 3.5: Custos estimados associados ao impacto climático da emissão de 1 tonelada de CO ₂ eq (<i>Social Carbon Cost</i> – SCC).....	103
Tabela 3.6: Passivos de saúde pública atribuíveis a poluição atmosférica: mortalidade e YLL.....	106
Tabela 3.7: Consolidação de valores de referência para valoração de impactos de EVP sobre a saúde pública	106
Tabela 3.8: Custos médios ocasionados por poluentes atmosféricos estimados para a saúde no Brasil.....	108
Tabela 4.1: Correlação entre períodos do dia e períodos de simulação	120
Tabela 4.2: Perdas de capacidade por configuração de parada de ônibus.....	129
Tabela 5.1: Parâmetros para representação de frota elétrica na operação do TCO	163
Tabela 5.2: Resultados principais obtidos por Basso e Silva (2014).....	165
Tabela 5.3: Principais resultados – Exploração introdutória.....	166
Tabela 5.4: Legendas da nomenclatura dos cenários e respectiva descrição	167
Tabela 5.5: Principais resultados – Diferentes tipologias de intervenção.....	177
Tabela 5.6: Principais resultados – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado	188
Tabela 5.7: Principais resultados – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções	195

Tabela 5.8: Principais resultados – Relevância da consideração dos impactos das EVP para a tomada de decisão	203
Tabela 5.9: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento.....	210
Tabela 5.10: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento	215
Tabela 5.11: Valoração dos impactos associados às EVP para análise de sensibilidade	223
Tabela 5.12: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP	223
Tabela 5.13: Cenário Base+CC/S* - Subsídios e cobranças por congestionamento	225
Tabela 0.1: Variações nos índices de preços ao consumidor (em janeiro, nos últimos 12 meses)	251
Tabela 0.2: Mediana das velocidades médias em cada grupo de trechos – Ônibus – Pico Tarde	253
Tabela 0.3: Velocidades de fluxo livre adotadas.....	253
Tabela 0.4: Capacidade média por faixa de tráfego adotada	254
Tabela 0.5: Correlação entre períodos do dia e períodos de simulação.....	258
Tabela 0.6: Demanda média horária por período – RMSP	259
Tabela 0.7: Ocupações médias ao longo de rotas ao longo do Corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro – trecho Eusébio Matoso-Consolação	260
Tabela 0.8: Ocupações médias ao longo de rotas ao longo do Corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro – trecho Chácara do Jockey-Terminal Morumbi	261
Tabela 0.9: Estimativas de demanda na seção junto à Parada Eldorado do Corredor Rebouças, no sentido Centro-Bairro, no cenário de referência	262
Tabela 0.10: Estimativas de Valor Subjetivo do Tempo (parâmetro SVT), por modo e por período	264
Tabela 0.11: Tarifas no cenário de referência, por modo e por período	264

Tabela 0.12: Valor dos demais parâmetros presentes nas funções de utilidade.....	265
Tabela 0.13: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Pico, a partir das equações do modelo analítico – Dados de entrada	266
Tabela 0.14: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados	267
Tabela 0.15: Resumo dos parâmetros para representação da demanda	269
Tabela 0.16: Variação relativa da demanda entre modos, dentre os períodos representados no modelo.....	270
Tabela 0.17: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Fora-Pico, a partir das equações do modelo analítico – Dados de entrada.....	271
Tabela 0.18: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Fora-Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados	272
Tabela 0.19: Emissões unitárias e velocidades médias por ciclo de condução – Ônibus	274
Tabela 0.20: Parâmetros das funções de emissões unitárias de poluentes – Ônibus	276
Tabela 0.21: Emissões unitárias e velocidades médias por ciclo de condução – Automóveis.....	277
Tabela 0.22: Parâmetros das funções de emissões unitárias de poluentes – Automóveis.....	277
Tabela 0.23: Relação entre emissões de PM pelo escapamento e por ressuspensão	278
Tabela 0.24: Custos médios operacionais de referência para sistemas de TCO	280
Tabela 0.25: Densidade de ocupantes na área de estudo e valores complementares, para referência	285

Tabela 0.26: Custos sociais associados à emissão de uma tonelada de CO ₂ eq (SCC)	286
Tabela 0.27: Valoração dos impactos associados à mortalidade prematura por exposição ao PM _{2.5}	287
Tabela 0.28: Parâmetros associados a veículos de diferentes tecnologias veiculares	291
Tabela 0.29: Fatores de conversão para representação de frota elétrica na operação do TCO	292
Tabela 0.30: Resumo dos parâmetros para representação da demanda – Cenário base-dr	293
Tabela 0.31: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base-dr, no período Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados	293
Tabela 0.32: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base-dr, no período Fora-Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados	294

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	29
1.1.	O Problema da Pesquisa	29
1.2.	Justificativa	31
1.3.	Objetivos	34
1.4.	Metodologia	35
1.5.	Descrição dos Capítulos	36
2.	Sistemas de Transporte Coletivo por Ônibus com Priorização de Circulação	39
2.1.	Discussão Introdutória	40
2.2.	Evolução Tecnológica na Operação de Sistemas de Transporte Coletivo por Ônibus.....	47
2.2.1.	Priorização de circulação ao TCO por meio de faixas exclusivas ...	48
2.2.2.	Sistemas de Bus Rapid Transit (BRT)	54
2.3.	Externalidades de Sistemas de Transporte Associadas a Poluentes Atmosféricos	56
2.3.1.	Mudanças climáticas: Efeitos em escala global	57
2.3.2.	Qualidade do ar: Efeitos em escala local	60
2.3.3.	Arcabouço conceitual para mitigação de impactos ambientais na operação de sistemas de transportes.....	63
3.	Métodos para Modelagem e Avaliação de Projetos de Transportes	67
3.1.	Modelos de Simulação de Transportes.....	68
3.1.1.	Grau de simplificação da representação de fenômenos em modelos de oferta	71
3.1.2.	Abordagem a dimensões não-físicas	74
3.2.	Modelos de Emissões Veiculares de Poluentes Atmosféricos	76

3.3.	Modelos de Estímulo-Resposta para Impactos de Poluentes Atmosféricos	83
3.3.1.	Efeitos em escala global.....	83
3.3.2.	Efeitos em escala local	87
3.4.	Valoração do Custo Social de Emissões de Poluentes Atmosféricos	101
3.4.1.	Efeitos em escala global.....	101
3.4.2.	Efeitos em escala local	103
4.	Modelo Analítico.....	109
4.1.	Introdução aos Exercícios Práticos	109
4.1.1.	Síntese crítica da revisão bibliográfica	109
4.1.2.	Abordagem proposta	115
4.1.3.	Cenário de referência	117
4.2.	Introdução ao Modelo Analítico	119
4.3.	Modelo de transportes.....	124
4.3.1.	Modelo de tráfego.....	124
4.3.2.	Modelo comportamental dos usuários.....	132
4.4.	Modelo de efeitos externos	144
4.4.1.	Emissões veiculares instantâneas de poluentes	144
4.4.2.	Efeitos globais	145
4.4.3.	Efeitos locais	146
4.5.	Modelo de planejamento de transportes	150
4.5.1.	Custos e receitas operacionais públicos.....	152
4.5.2.	Custos sociais dos efeitos externos	155
4.5.3.	Excedente do consumidor	156
4.5.4.	Projeção de resultados para o horizonte de análise.....	156
4.5.5.	Função de mérito do planejador	156

5.	Aplicação e Discussão.....	159
5.1.	Tipologias de intervenções	159
5.1.1.	Representação dos cenários no modelo analítico.....	161
5.2.	Avaliação de tipologias de intervenções	163
5.2.1.	Exploração introdutória	164
5.2.2.	Diferentes tipologias de intervenções	177
5.2.3.	Complementaridade entre tipologias de intervenções	187
5.2.4.	Síntese parcial	201
5.3.	Análise exploratórias complementares	202
5.3.1.	Relevância da consideração dos impactos das EVP para a tomada de decisão	203
5.3.2.	Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento	209
5.3.3.	Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento	215
5.3.4.	Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP	222
6.	Conclusões.....	231
6.1.	Síntese crítica dos resultados	232
6.2.	Propostas para pesquisas complementares	237
	Referências	239
	Apêndice: Implementação do modelo analítico e cálculos complementares	251
A)	Parâmetros para representação da operação do sistema de transportes.....	252
a)	Parâmetros das funções de desempenho das faixas de tráfego	252
b)	Parâmetros das funções de desempenho para manobras de embarque e desembarque.....	254
c)	Parâmetros das funções de atraso em paradas de ônibus.....	255

B)	Parâmetros para representação da demanda – cenário de referência e período Pico	255
C)	Parâmetros para o modelo comportamental – nível inferior, ninho Pico ..	262
D)	Parâmetros para representação da demanda – período Fora-Pico e dia-de-trabalho	268
E)	Parâmetros para as funções de utilidade – estrutura hierárquica.....	270
F)	Parâmetros para estimativa das emissões veiculares de poluentes	273
a)	Ônibus.....	273
b)	Automóveis	276
c)	Emissões de material particulado que não pelo escapamento	277
G)	Parâmetros para cálculo de custos operacionais e econômicos	278
a)	Custos operacionais do sistema de transporte coletivo por ônibus.....	278
b)	População exposta ao Material Particulado	283
c)	Valoração dos impactos decorrentes das emissões veiculares de poluentes	286
H)	Fórmulas para cálculo dos custos sociais médios.....	287
I)	Alteração nos parâmetros operacionais do sistema de transporte coletivo por ônibus com eletrificação da frota	290
J)	Construção do cenário com demanda reduzida	293

LISTA DE SIGLAS, NOTAÇÕES E ABREVIações

AGWP: *Absolute Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global Absoluto)

AH: *Analysis Horizon* (Horizonte de Análise)

AP: Área Paga (referindo-se à intervenção denominada “Área Paga”)

BRT: *Bus Rapid Transit* (Transporte Coletivo Rápido por Ônibus)

CC: Cobrança por Congestionamento / *Congestion Charging*

CC/S: Cobrança por Congestionamento e Subsídio

CFC: Clorofluorcarbonetos

CO: Monóxido de Carbono

CO₂: Dióxido de Carbono

CO₂eq: Dióxido de Carbono equivalente

Cov[X,Y] (sendo X e Y variáveis aleatórias): Covariância entre as variáveis X e Y

DALY: *Disability adjusted life years*, ou Anos de vida perdidos e vividos com incapacidades (tradução segundo MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014)

DMRB: *Design Manual for Roads and Bridges*

EVP: Emissões Veiculares de Poluentes

E[X] (sendo X uma variável aleatória): Valor esperado para a variável X

FC: *Fuel Consumption* (Consumo de Combustível)

FEO: Faixas Exclusivas de Ônibus

FU: Faixa de Ultrapassagem [exclusiva aos ônibus] (referindo-se também à intervenção denominada “Faixa de Ultrapassagem”)

GEE ou GHG: Gases de Efeito Estufa (*greenhouse gases*)

GWP: *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)

HC: Hidrocarbonetos

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

OD-RMSP: Pesquisa Origem-Destino da Região Metropolitana de São Paulo

MSP: Município de São Paulo

NH₃: Amônia

NMHC: *Non-methane hydrocarbons* (Hidrocarbonetos exceto metano)

NO: Óxido Nítrico

NO₂: Dióxido de Nitrogênio

NO_x: Óxidos de Nitrogênio

N₂O: Óxido Nitroso

OE: Ônibus Elétricos (referindo-se à intervenção denominada “Ônibus Elétricos” ou “eletrificação da frota”)

Pax*km ou PKM: Passageiros*quilômetro

Pcu: *passenger car units* (unidade de veículos de passeio)

PM: *Particulate Matter* (Material Particulado)

PM_x: Material Particulado de diâmetro inferior a x milímetros

Pr[“Sentença”]: Probabilidade de que “Sentença” seja verdadeira

PROCONVE: Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

RMSP: Região Metropolitana de São Paulo

RR: *Relative Risk* / Risco Relativo

SCC: *Social Carbon Cost* (Custo Social do Carbono)

SO_x: Óxidos de Enxofre

SO₂: Dióxido de Enxofre

SO₄: Íon Sulfato

TCO: Transporte Coletivo por Ônibus

TIA: Transporte Individual por Automóvel

Var[X] (sendo X uma variável aleatória): Variância da variável X

VKM: Veículos*quilômetro

VOC: *Volatile Organic Compounds* (Compostos Orgânicos Voláteis)

VOLY: *Value of Life Year* (Valor do Ano de Vida [estatístico])

VV: Valor da vida (estatístico)

wd: dia-de-trabalho (período de um dia útil entre 06h e 20h30)

WHO: *World Health Organization* (Organização Mundial da Saúde)

YLD: *Years of life lived with disability* (Anos de vida vividos com incapacidades)

YLL: *Years of life loss* (Perda de anos de vida)

[X] (sendo X um elemento químico): Concentração do elemento X no meio

[X] (sendo X uma unidade de medida): Dimensão de uma referida variável

LISTA DE VARIÁVEIS DO MODELO ANALÍTICO¹

A_h : Variável genérica (“A”), em representação associada ao período h [representação genérica]

A_{wd} : Variável genérica (“A”) em representação associada ao dia-de-trabalho (índice wd) [representação genérica]

$a_{car,h}$: Número de ocupantes médio em automóveis no período h [pax/veículo]

$AGWP_i$: GWP absoluto do poluente i [W/m^2]

C : Capacidade do segmento em análise [pcu/h]

C_q : Custos proporcionais aos quilômetros percorridos associados à operação do sistema de Transporte Coletivo por Ônibus (TCO) [$\frac{R\$}{\text{ônibus*km}}$]

C_h : Custos proporcionais às horas de operação da frota do sistema de TCO [$\frac{R\$}{\text{ônibus*hora}}$]

C_s : Custos do sistema médios associados à operação do sistema de TCO [$\frac{R\$}{\text{ônibus*hora}_{pico}}$]

$\tilde{C}_{op,bus,h}$: Primeira aproximação dos Custos operacionais associados à operação do sistema de TCO no período h , calculada considerando $\mu_{0,h} = 0$ [R\$/h]

$C_{op,bus,h}$: Custos operacionais alocáveis à operação do sistema de TCO no período h [R\$/h]

CS_{wd} : Excedente do consumidor [R\$/dia]

$CGV_{m,h}$: Custo generalizado de viagem associado ao modo m e ao período h [R\$/km]

$e_{pol,h}$: Emissões totais de poluente pol nas condições operacionais do período h , considerando tecnologia veicular compatível com o cenário de referência [g/h]

$e_{CO_{2eq},h}$: Emissões equivalentes totais nas condições operacionais do período h , considerando tecnologia veicular compatível com o cenário de referência [$\frac{g_{CO_{2eq}}}{h}$]

est_{car} : Custo médio de estacionamento para automóveis [R\$]

$f_{bus,h}$: Frequência de serviços de ônibus no período h [ônibus/h]

GWP_i : GWP equivalente do poluente i , em relação ao dióxido de carbono [adimensional]

¹ Em ordem alfabética; primeiramente caracteres do alfabeto romano; depois, caracteres do alfabeto grego. Variáveis utilizadas de forma auxiliar em outras seções do texto não estão listadas.

H_h : Duração do período h [horas]

k_{bus} : Capacidade média dos veículos empregados na operação dos serviços de ônibus [pax/ônibus]

$K_{berth,ideal}$: Capacidade ideal por berço de uma parada de ônibus [ônibus/h]

$K_{stop,ideal}$: Capacidade ideal de uma parada de ônibus [ônibus/h]

K_{stop} : Capacidade efetiva de uma parada simples, i.e., com uma subparadas contendo dois berços [ônibus/h]

K_{stop2} : Capacidade efetiva de uma parada dupla, i.e., com duas subparadas contendo dois berços, cada [ônibus/h]

$K_{stop,ns}$: Capacidade efetiva de uma parada simples situada junto à faixa de retenção de um semáforo [ônibus/h]

$K_{stop2,ns}$: Capacidade efetiva de uma parada dupla situada junto à faixa de retenção de um semáforo [ônibus/h]

$\%K_n$: Perda de capacidade por berço, em relação à capacidade ideal, considerando uma parada de ônibus com n berços [adimensional]

$\%K_{block}$: Perda de capacidade na parada de ônibus devido à presença de semáforo adjacente à jusante [adimensional]

L : Extensão do trecho em análise – e, por premissa, da viagem dentro do veículo [km]

$load_{h,avg}$: Ocupação relativa média de ônibus em serviço no período h [adimensional]

M_0 : Eventos (mortes) na linha de base [eventos/ano]

$\%M_{0,MSP}$: Taxa de mortalidade (média) na linha de base incidente sobre a população o Município de São Paulo [eventos/habitantes]

$mcpf$: Custo marginal dos fundos públicos, em termos relativos [adimensional]

n_{doors} : Número de portas do lado de embarque e desembarque, por ônibus [portas/ônibus]

n_{berth} : Número de berços por parada ou sub-parada [berços]

Q : Demanda do segmento em análise [pcu/h]

oc_{car} : Custo médio de utilização de automóveis [R\$/VKM]

p_{cor} : Quantidade de paradas por quilômetro ao longo do corredor de ônibus [paradas/km]

p_i : Probabilidade de escolha da alternativa i [adimensional]

$p_{0,i}$: Probabilidade de escolha da alternativa i no cenário de referência [adimensional]

pop_h : Densidade populacional no entorno do trecho ao longo do período h [$\frac{hab}{km*m}$]

$pop_{oc,h}$: Densidade populacional de ocupantes no entorno do trecho, no período h [$\frac{hab}{km*m}$]

$pop_{tr,h}$: Densidade populacional de viajantes no entorno do trecho no período h (correspondente ao sentido de análise) [$\frac{hab}{km*m}$]

$pop_{tr,\bar{h}}$: Densidade populacional de viajantes no entorno do trecho, correspondente ao sentido oposto ao de análise do sentido representado pelo período h [$\frac{hab}{km*m}$]

$\overline{pop}$: População exposta média ao longo do dia-de-trabalho [habitantes]

$R_{op,bus,h}$: Receita operacional do sistema de ônibus associada à parcela da operação representada pelo período h [R\$/h]

$R_{op,car,h}$: Receita operacional do sistema de cobrança pelo congestionamento de veículos de Transporte Individual por Automóvel (TIA) [R\$/h]

$RF_i(t)$: RF atribuído ao poluente i , em função do tempo t transcorrido após sua emissão [W/m^2]

$S_{bus,h}$: Subsídio tarifário por usuário do sistema de TCO, no período h [R\$/pax]

S : Saturação do segmento viário em análise [adimensional]

s_{ac} : Velocidade média de caminhada de/para paradas de ônibus [km/h]

SW : Bem Estar ou Bem Estar Social [$\frac{R\$}{dia}$]

SW_{EVP} : Parcela do Bem Estar decorrente diretamente dos impactos das EVP [$\frac{R\$}{dia}$]

SW_{-EVP} : Parcela do Bem Estar não decorrente diretamente dos impactos das EVP [$\frac{R\$}{dia}$]

$SW_{k,h}$: Componente do Bem Estar associada à dimensão k e ao período h [$\frac{R\$}{h}$]

$SW_{k,wd}$: Componente do Bem Estar associada à dimensão k e ao dia-de-trabalho (wd) [$\frac{R\$}{dia}$]

$\overline{sw}_{k,m,h}$: Medida oposta ao custo social médio, por passageiro*quilômetro, do modo m , no período h , associada à dimensão k [$\frac{R\$}{PKM}$]²

$\overline{sw}_A$: Medida oposta ao custo social médio, por passageiro*quilômetro, incidente no cenário “A” [$\frac{R\$}{PKM}$]²

$\overline{sw}_{EVP}$: Medida oposta ao custo social médio, por passageiro*quilômetro, relativa exclusivamente a impactos associados às EVP [$\frac{R\$}{PKM}$]²

$\overline{sw}_{-EVP}$: Medida oposta ao custo social médio, por passageiro*quilômetro, excluindo-se os impactos associados às EVP [$\frac{R\$}{PKM}$]²

² Os subscritos das variáveis de custos sociais médios ($\overline{sw}$ e $\widehat{sw}$) são combinados para especificação inequívoca da referência em questão.

$\widehat{sw}_+$: aproximação da variável $\overline{sw}$ obtida através da “abordagem otimista”, conforme descrito na seção 5.3.2 $[\frac{R\$}{PKM}]^2$

$\widehat{sw}_-$: aproximação da variável $\overline{sw}$ obtida através da “abordagem pessimista”, conforme descrito na seção 5.3.2 $[\frac{R\$}{PKM}]^2$

$SVT_{m,h}$: Valor subjetivo do tempo para usuários do modo m no período h [R\$/h]

TC_i : Contribuição incremental do tráfego para as concentrações do poluente i no entorno do segmento viário em questão $\left[\frac{\frac{\mu g}{m^3}}{\left(\frac{g}{km \cdot h} \right)} \right]$

$T_{m,h}$: Tarifa de uso incidente sobre usuários do modo m no período h – correspondente à cobrança pelo congestionamento, no caso de usuários de automóveis, e à tarifa pública de ônibus, no caso de usuários de ônibus [R\$]

$\%T_{bus,0}$: Razão entre passageiros pagantes equivalentes e total de embarques, no cenário de referência [adimensional]

$\%T_{car,0}$: Razão entre receita operacional líquida e receita operacional bruta associada, no sistema de cobrança pelo congestionamento de veículos de TIA [adimensional]

t : Taxa de viagem (notação genérica) – definida como o inverso da velocidade [h/km]

t_{ac} : Taxa de viagem na caminhada de/para pontos de parada, por quilômetro [h/km]

$t_{boa/ali}$: Taxa de viagem associada a manobras de embarque e desembarque, por quilômetro [h/km]

$t_{boa/ali,0}$: Taxa de viagem associada ao tempo “morto” em manobras de embarque e desembarque, por quilômetro [h/km]

$t_{ff,m}$: Taxa de viagem para demanda nula (ou fluxo livre) associada ao modo m [h/km]

$t_{m,h}$: Taxa de viagem associada ao modo m e ao período h , para as condições de demanda e operação corrente [h/km]

$t_{stop,h}$: Tempo de atraso em paradas de ônibus, ao longo do corredor, decorrentes de sua saturação [h/km]

$t_{w,h}$: Tempo de espera pelos serviços de ônibus no período h [h/km]

$ue_{m,pol,2007,h}$: Emissões unitárias de poluente pol do modo m nas condições operacionais do período h , considerando tecnologia veicular compatível com o ano de 2007 [g/VKM]

$ue_{m,pol,h}$: Emissões unitárias de poluente pol do modo m nas condições operacionais do período h , considerando tecnologia veicular compatível com o cenário de referência [g/VKM]

ut_{board} : Tempo unitário de embarque, por passageiro embarcando [h/pax]

$u\tau_{boa/ali,0}$: Tempo unitário médio de embarques e desembarques, por passageiro embarcando ou desembarcando, por porta [h/pax/porta]

$u\tau_{boa/ali}$: Tempo unitário médio de embarques e desembarques, por passageiro embarcando ou desembarcando [h/pax]

U_i : Utilidade aleatória associada à alternativa i [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

V_i : Parcela sistemática da utilidade associada à alternativa i [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

$\tilde{V}_{0,bus,h}$: Aproximação da utilidade sistemática do modo ônibus no período h , no cenário de referência, considerando $\theta_{b,h} = 0$ [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

$\tilde{V}_{0,h}$: Aproximação da utilidade sistemática do período h , no cenário de referência, considerando $\theta_h = 0$ [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

$\tilde{X}_{m,h}$: Vetor de variáveis explicativas da função de utilidade de viajar utilizando o modo m no período h [representação genérica]

$X_{k,m|h}$: Valor da variável k na função de utilidade da alternativa m (dada a escolha prévia do ninho h) [representação genérica]

Y_{tot} , Y_{pot} : Demanda total (ou potencial) associada ao sistema [pessoas/dia]

Y_{nt} : Parcela da demanda total que não realiza viagens nos períodos representados [pessoas/dia]

Y_h : Parcela da demanda total que realiza viagens no período h [pessoas/dia]

$y_{m,h}$: Demanda pela utilização modo m no período h [viagens/h]

α_{BPR} : Parâmetro de calibração das funções de fluxo-demora [adimensional];

β_{BPR} : Parâmetro de calibração das funções de fluxo-demora [adimensional];

$\tilde{\beta}_{m,h}$: Vetor de parâmetros associados a cada variável explicativa da função de utilidade de viajar utilizando o modo m no período h [representação genérica]

$\beta_{k,m|h}$: Coeficiente da variável k na função de utilidade da alternativa m (dada a escolha prévia do ninho h) [representação genérica]

γ_w : Fator de equivalência do tempo gasto esperando por serviços de ônibus, em relação ao tempo de viagem por ônibus dentro do veículo [adimensional]

γ_a : Fator de equivalência do tempo gasto caminhando de/para paradas de ônibus, em relação ao tempo de viagem por ônibus dentro do veículo [adimensional]

ΔM : Variação na quantidade de eventos (mortes) [eventos/ano]

$\Delta[PM_{2.5}]_{avg,h}$: Concentração diária incremental média de $PM_{2.5}$ decorrente de uma hora de operação do período h $\left[\frac{\mu g}{m^3 \cdot h} \right]$

$\Delta[PM_{2.5}]_{avg}$: Concentração diária incremental média de $PM_{2.5}$ $\left[\frac{\mu g}{m^3 \cdot dia} \right]$

ε_i : Parcela aleatória da utilidade associada à alternativa i [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

$\eta_k^{Y_{m|h}}$: Elasticidade da demanda pela escolha do modo m no período h em relação ao valor da variável k [adimensional]

$\theta_{b,h}$: Constante específica do modo ônibus no período h [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

θ_h : Constante específica do período h [utis ou unidade alternativa, quando especificado]

λ_1 : Parâmetro de escala relativo ao nível superior da árvore de decisão do modelo comportamental do usuário [utis/R\$]

λ_2 : Parâmetro de escala relativo ao nível inferior da árvore de decisão do modelo comportamental do usuário [utis/R\$]

$\mu_{0,h}$: Coeficiente de rateio de custos operacionais do sistema de TCO relativo à operação representada pelo período h – definido no item 4.5.1 [adimensional]

ρ_λ : Razão entre parâmetros de escala dos níveis inferior e superior [adimensional]

ρ_{oc} : Densidade populacional de ocupantes nas zonas do entorno do corredor [hab/área]

$\tau_{boa/ali}$: Tempo gasto em manobras de embarque e desembarque, por parada de ônibus [h/parada]

$\tau_{boa/ali,0}$: Tempo “morto” associado a manobras de embarque e desembarque, por parada de ônibus [h/parada]

τ_{red} : Tempo de vermelho incidente durante o ciclo semafórico [segundos]

τ_{signal} : Tempo de ciclo semafórico [segundos]

τ_{stop} : Tempo de espera junto a paradas até que seja possível realizar manobras de embarque e desembarque, por parada de ônibus [h/parada]

ϕ_{cor} : Parcela da capacidade do trecho em estudo alocada com exclusividade ao tráfego de ônibus [adimensional]

ϕ_{ap} : Aproveitamento médio da capacidade do serviço de TCO, definido na seção 2.1 [adimensional]

$\tilde{\phi}_{ap}$: Parcela do aproveitamento médio correspondente ao desbalanceamento da demanda entre sentidos – que não é representada pela diferença entre ocupações médias em cada sentido [adimensional]

$\chi_{stop,ns,h}$: Saturação das paradas de ônibus adjacentes a semáforos a jusante, no período h [adimensional]

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a motivação fundamental desta pesquisa, revisando brevemente os estudos que afirmam a relevância das emissões de poluentes atmosféricos produzidas pelo transporte urbano – e, neste campo, a importância das políticas destinadas a ampliar a presença do transporte coletivo de modo a aumentar a eficiência operacional dos sistemas de transporte como um todo.

Destaca-se que o termo “eficiência operacional” é empregado, na presente pesquisa, tendo em vista o horizonte temporal dos fenômenos em estudo, isto é, os efeitos de curto-prazo associados à operação dos sistemas de transportes. É importante reconhecer que a busca pela eficiência operacional se insere no agenda dos planejadores de transportes como componente de um paradigma mais amplo que visa, em última instância, a promoção da acessibilidade sustentável às atividades econômicas, sociais ou de naturezas diversas que se dão de forma distribuída espacialmente.

Ao final deste capítulo introdutório, é resumida a estrutura do trabalho que se apresentará em seguida.

1.1. O Problema da Pesquisa

A pesquisa busca identificar as questões críticas a serem observadas na avaliação de intervenções sobre sistemas de transporte urbano rodoviário, com ênfase em corredores de transporte coletivo por ônibus (TCO), tendo em vista as emissões instantâneas³ de poluentes atmosféricos⁴ e seus impactos diretos. Adicionalmente, a

³ O termo *instantâneas* refere-se às emissões decorrentes do desenvolvimento da atividade de transportar pessoas e/ou materiais em si, excluindo emissões associadas às cadeias produtivas dos recursos envolvidos (e.g., produção de veículos, infraestrutura, combustíveis e demais insumos). Daqui em diante o termo *instantâneas* será omitido, devendo-se entender *emissões de poluentes* como *emissões instantâneas de poluentes*.

⁴ A presente pesquisa trata apenas de poluentes atmosféricos emitidos por veículos rodoviários. O termo “atmosférico” é por vezes omitido, visando tornar o texto menos cansativo, de modo que o termo

pesquisa busca avaliar, de forma genérica, os potenciais impactos associados a diferentes tipologias de intervenção sobre tais sistemas.

Em específico, busca-se explorar, num primeiro momento, a sensibilidade de métodos de avaliação de projetos de transporte em contextos urbano a parâmetros operacionais comumente afetados por intervenções em corredores de TCO, de modo a permitir a compreensão de como especificar métodos de avaliação de forma adequada para tais contextos. Adicionalmente, a pesquisa envolve uma quantificação genérica do potencial impacto de intervenções sobre sistemas de transporte urbano, com foco em corredores de TCO, como estratégia de redução de emissões de poluentes.

A etapa de avaliação do potencial impacto das referidas intervenções tem como enfoque complementar, por meio do desenvolvimento de exercícios práticos, a identificação de pontos críticos a serem observados e endereçados na avaliação, no desenho e no emprego de tais medidas. Durante tais exercícios práticos, é avaliada a sensibilidade dos resultados e conclusões produzidos à estrutura dos métodos de avaliação empregados. A lista de aspectos a serem examinados abrange:

- A consideração de aspectos dinâmicos da operação dos sistemas de transportes (especialmente os relacionados à formação de gargalos e operação segregada da infraestrutura);
- A sensibilidade dos modelos de emissão de poluentes às variáveis básicas de operação – em contraposição a simplificações excessivas que impactem negativamente na consistência dos resultados;
- A relevância de se avaliar explicitamente períodos de menor demanda e carregamento no sistema de transportes;
- A abrangência a efeitos finais relevantes (como grau de exposição da população à poluentes atmosféricos);
- A metodologia para projeção dos resultados referentes ao período de análise (e.g., horas-pico de dias úteis) em efeitos anuais e de médio prazo.

Da revisão bibliográfica às aplicações práticas e conclusões, é dado enfoque ao contexto nacional – com destaque à São Paulo e sua região metropolitana (RMSP), enquanto maiores aglomerações urbanas do país – de modo a contribuir com a

“poluente” é usado de forma equivalente e intercambiável a “poluente atmosférico” ao longo da dissertação.

qualificação do estado-da-prática localmente no âmbito da avaliação de projetos de transportes e do emprego apropriado de intervenções sobre sistemas de transporte coletivo por ônibus em áreas urbanas. Complementarmente, toma-se como referência, ainda, a literatura científica e as práticas em curso no cenário internacional, a fim de agregar referências consagradas, estudos de caso relevantes e informações complementares consideradas pertinentes ao atingimento dos objetivos da pesquisa.

1.2. Justificativa

A relevância do impacto das emissões de poluentes atmosféricos⁵ tem sido recorrentemente afirmada, seja para questões climáticas (ANDRADE et al., 2017; IPCC 2013; IPCC, 2014) ou de saúde pública (ANDRADE et al., 2017; MIRAGLIA et al., 2005; POPE et al., 2004; RIBEIRO, 2018; SALDIVA et al., 2006).

Atualmente, estratégias para mitigação de emissões de poluentes atmosféricos apresentam-se como tópicos críticos nas agendas de políticas públicas em escala internacional, motivado pela crescente preocupação com a interferência antropológica no equilíbrio atmosférico e nas condições climáticas em escala global, bem como pela incisiva atuação de cúpulas e agências internacionais (e.g., UNITED NATIONS, 2015).

No âmbito da saúde pública, o atual panorama nacional de má qualidade do ar em áreas urbanas, nas quais os limites propostos por órgãos internacionais (WHO, 2006) são recorrentemente superados (CETESB, 2015), corrobora com a relevância local de tais estratégias mitigatórias. Ainda que sejam observadas tendências consistentes de queda nas últimas décadas para poluentes como CO e CO₂ (ANDRADE et al., 2017; CETESB, 2015), nota-se que poluentes além dos óxidos de carbono, como o NO₂, O₃ e PM (dióxido de nitrogênio, ozônio e material particulado, respectivamente), persistem causando danos à saúde (WHO, 2013) e respondem de forma menos efetiva ao controle de medidas mitigatórias (ANDRADE et al., 2017). No cenário internacional, há um consenso quanto a relevância de seus impactos adversos, sendo possível encontrar evidências de que a poluição do ar se apresente como uma das

⁵ Os termos “poluentes atmosféricos” e “poluentes do ar” são considerados e utilizados como equivalentes no presente trabalho.

principais externalidades negativas (VTPI, 2009) ou até a maior externalidade negativa do transporte urbano após os custos associados aos congestionamentos, superando custos de acidentes em alguns estudos (e.g., WANG et al., 2014).

À medida que a compreensão sobre os efeitos da poluição atmosférica avança, a urgência atribuída a medidas mitigatórias torna-se especialmente justificável. No contexto nacional, estimativas do final do século XX apontavam para custos sociais anuais da ordem de US\$ 2 Milhões (MOTTA e MENDES, 1994) advindos de problemas de saúde associados à qualidade do ar no município de São Paulo. Estimativas atuais indicam que tais passivos superem a marca de US\$ 1 Bilhão por ano, considerando-se as Regiões Metropolitanas da Baixada Santista, Belo Horizonte, Campinas, Curitiba, Rio de Janeiro, São Paulo e Vitória (MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014). Destaca-se ainda que em ambos os casos deve-se somar os demais efeitos associados aos poluentes emitidos (como efeitos climáticos).

O horizonte de atuação dos planejadores de transporte evidencia-se à medida que a participação do setor nas emissões de poluentes atmosféricos é melhor compreendida. Inventários recentes indicam que os sistemas de transportes chegam a representar até 97% da emissão de poluentes localmente, como no caso do CO (CETESB, 2015). Adicionalmente, identifica-se que mesmo sendo responsável por aproximadamente um terço das viagens na RMSP, o transporte privado é o principal contribuinte para as emissões da maioria dos poluentes no transporte rodoviário urbano (IEMA, 2019). Segundo o referido inventário, este segmento de usuários responde por 76% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e por 97% da quilometragem total percorrida por veículos no Município de São Paulo em um dia típico, ao passo que os ônibus respondem por 24% e 3%, respectivamente. Ainda que usualmente se observe taxas de emissões de poluentes por passageiro*quilômetro inferiores para veículos de transporte público, quando comparados a veículos de transporte privado, destaca-se o fato de que a taxa de emissões por veículo*quilômetro para veículos de transporte coletivo é superior e faz com que este segmento apresente participação relevante dentre as emissões totais – o que justifica que intervenções sobre os sistemas de transporte coletivo não sejam desconsideradas.

No âmbito da atuação dos planejadores de transportes, é razoável considerar a proposta mais ampla de que medidas de intervenção e de priorização em favor de

modos mais eficientes (dentre os quais, usualmente inclui-se o TCO) sejam vistas não meramente como medidas de comando e controle, típicas da Engenharia, mas também sob a ótica dos incentivos proporcionados a usuários destes modos (e dos desincentivos impostos a usuários de modos menos eficientes). Esta ótica permite o enquadramento das referidas intervenções operacionais como medidas baseadas em incentivos, análogas às baseadas na teoria econômica, que visem dirigir o equilíbrio do sistema a resultados economicamente mais positivos, por meio de intervenção sobre a incidência e a distribuição dos custos (principalmente externos) dentre os diferentes modos.

Numa revisão extensiva sobre externalidades (e.g., emissões de poluentes atmosféricos) e políticas econômicas no transporte rodoviário, Santos et al (2010) destacam que medidas de comando e controle tendem a ser ineficientes na distribuição de impactos e de recursos, quando comparadas a medidas baseadas em incentivos (e desincentivos) de mercado, como a cobrança por congestionamento (*congestion charging*, em tradução livre). O estudo destaca, porém, que medidas baseadas em incentivos de mercado são preteridas em favor de medidas de comando e controle, na prática, pois a aplicação destas tipicamente provoca custos de implementação e conflitos políticos em menor escala que aquelas.

Deste ponto de vista, é de esperar-se que intervenções de Engenharia em sistemas de transporte urbano em favor do TCO sejam amparadas nas mesmas vantagens práticas que as medidas de comando e controle usualmente apresentam, sem a perda de eficiência atribuída a esta classe de medidas quando comparadas a medidas baseadas em incentivos – apresentando-se, portanto, como estratégias factíveis e com significativo potencial para a redução das externalidades associadas ao transporte urbano.

Em particular, as estatísticas produzidas pelos inventários de emissões de poluentes atmosféricos na RMSP indicam que favorecendo a circulação de veículos de transporte coletivo é possível atacar o problema das emissões de poluentes em meio urbano por duas frentes: primeiramente, ao induzir a migração modal em direção ao uso de modos mais eficientes (atuando como medida baseada em incentivos, aproximando-se de medidas baseadas e defendidas na teoria econômica); e em segundo lugar, ao reduzir o nível de congestionamento enfrentado por esta parcela

limitada de veículos mais poluentes (i.e., veículos de transporte público), fazendo com que seu deslocamento se dê com menos interferências e potencialmente ocasionando reduções nas emissões durante o percurso destes veículos (atuando como medida de gestão operacional, aproximando-se de medidas de Engenharia).

1.3. Objetivos

Tendo em vista a relevância do setor de transportes como emissor de poluentes atmosféricos, é destacada a necessidade de corrigir ineficiências persistentes na operação de sistemas de transporte urbano. Numa visão ampla, a presente pesquisa busca explorar o emprego de intervenções sobre tais sistemas, com foco em corredores de TCO, como estratégias de mitigação de emissões veiculares de poluentes (EVP).

Adicionalmente, objetiva-se estabelecer diretrizes para o emprego de métodos de avaliação econômica de projetos envolvendo intervenções sobre a operação de sistemas de transporte urbano como estratégias de redução de emissões de poluentes. Em particular, tais diretrizes devem contemplar a especificação de ferramentas e abordagens adequados no tangente à obtenção resultados consistentes e sensíveis às principais variáveis associadas ao desenho de estratégias de priorização ao transporte coletivo no transporte urbano.

Mais especificamente, a pesquisa propõe-se a explorar modelos e métodos empregados nas avaliações de impacto de intervenções sobre a operação do sistema de transportes (i.e., avaliação de projetos de transportes), bem como na avaliação de estratégias de mitigação de emissão de poluentes em sistemas de transportes (i.e., modelos de estimativas de emissões veiculares de poluentes). A partir desta revisão, a pesquisa busca combinar o desenvolvimento da literatura científica recente ao estado da prática das técnicas de avaliação de projetos de transporte para fins de proposição de diretrizes para métodos de avaliação que sejam adequados aos problemas em questão.

Complementarmente, a pesquisa visa evidenciar a relevância de se considerar detalhadamente as emissões de poluentes no desenho destas estratégias, em contraste com conclusões obtidas negligenciando-se tais dimensões nas aplicações práticas desenvolvidas.

1.4. Metodologia

A proposta metodológica consiste na exploração das principais configurações dos modelos de emissões veiculares de poluentes (EVP) empregados para fins de avaliação de projetos no âmbito da Engenharia de Transportes, envolvendo a identificação dos principais fatores associados às EVP (e.g., velocidade média, perfil de aceleração, combustível, características do motor) bem como das principais externalidades associadas a estas emissões (efeitos globais, como aumento de temperatura média; e efeitos locais, como taxa de incidência de doenças respiratórias).

Conjuntamente, são discutidas as abordagens para tradução de estimativas de poluentes (e.g., quilogramas de dióxido de carbono; gramas de material particulado) no período de análise (e.g., hora-pico) em estimativas de efeitos finais (globais e locais) no horizonte de análise (e.g., dia, ano), ainda que em menor profundidade.

As conclusões estabelecidas nesta etapa servem de insumo para o desenvolvimento de exercícios práticos, nos quais é avaliado o impacto o potencial impacto de tipologias de intervenções sobre o transporte urbano e o transporte público. Os exercícios práticos são desenvolvidos com base na exploração de um modelo analítico estilizado, baseado em modelos como os empregados nos trabalhos de Basso et al. (2011) e Basso e Silva (2014). Nos referidos estudos, são avaliadas distintas intervenções sobre o sistema de transporte urbano, a saber: implementação de faixas exclusivas de ônibus; subsídio à operação do sistema de transporte coletivo; e cobrança pela circulação de veículos de transporte individual.

O desenvolvimento do modelo analítico utilizado na presente pesquisa baseia-se no contexto do corredor de ônibus Campo Limpo-Rebouças-Centro, um dos corredores de ônibus com maior tráfego de passageiros no Município de São Paulo (MSP). Nos exercícios práticos baseados na aplicação do modelo analítico, objetiva-se compreender o desempenho do sistema de transporte coletivo por ônibus do ponto de vista das externalidades ambientais (i.e., seus efeitos sobre a saúde pública e sobre o equilíbrio climático), levando em conta um contexto realista e aspectos como a presença de densa ocupação em seu entorno, a elevada demanda em termos veiculares e de passageiros, e a forte interferência entre a operação de distintos modos rodoviários.

Os exercícios práticos são estruturados a partir da avaliação de diferentes tipologias de intervenções sobre o transporte urbano e o sistema de TCO. Adicionalmente, são realizadas análises complementares às avaliações de impacto das tipologias de intervenção consideradas, visando compreender o grau de sensibilidade dos resultados e das conclusões obtidas às características dos métodos de análise e avaliação empregados.

1.5. Descrição dos Capítulos

A sequência do texto da Dissertação é estruturada como segue: o Capítulo 2 apresenta uma perspectiva histórica a respeito de tópicos relevantes ao tema da pesquisa, como aspectos operacionais em sistemas de TCO, conflitos relevantes persistentes em sistemas de transporte urbano e externalidades associadas à operação de tais sistemas. No referido capítulo, busca-se consolidar as fundações conceituais a servirem de insumo para as discussões sobre os métodos empregados na modelagem de sistemas de transportes e em avaliações de projeto neste âmbito.

O Capítulo 3 discorre sobre métodos para modelagem e avaliação de projetos de transporte, contrastando o estado da prática de cada componente com os requerimentos impostos indiretamente pelo problema da pesquisa para que o método seja sensível aos elementos críticos do problema e de seu contexto usual. Deste capítulo, resultam recomendações acerca da metodologia a ser efetivamente empregada (nas aplicações práticas e em contextos similares), novamente abordando-se individualmente cada componente do método de avaliação.

O Capítulo 4 inicia-se com uma síntese crítica da revisão bibliográfica desenvolvida nos capítulos anteriores e, partindo das lacunas identificadas, detalha o modelo analítico formulado e empregado no âmbito da presente pesquisa, descrevendo tanto o arcabouço conceitual quanto a metodologia que sustentam seu desenvolvimento. Destaca-se que aspectos relativos à implementação do modelo analítico são apresentados nos itens do Apêndice da Dissertação.

O Capítulo 5 apresenta a aplicação do modelo analítico no desenvolvimento dos exercícios práticos mencionados ao longo deste capítulo introdutório. A aplicação é abordada juntamente da discussão dos resultados obtidos.

Finalmente, as conclusões obtidas a partir da revisão bibliográfica e dos exercícios práticos desenvolvidos são sumarizadas no Capítulo 6. Conjuntamente, são apresentadas recomendações genéricas para trabalhos futuros que busquem dar continuidade à exploração dos problemas abrangidos pela presente pesquisa.

2. SISTEMAS DE TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS COM PRIORIZAÇÃO DE CIRCULAÇÃO

Em cidades e regiões metropolitanas de diversos países e continentes, é possível observar a provisão de benefícios e privilégios operacionais a sistemas de transporte coletivo por ônibus (TCO), como estratégia de promoção da eficiência do transporte urbano. A priorização da circulação a veículos do TCO está entre as estratégias mais efetivas e viáveis formas de ação para melhoria do transporte urbano, embora possa ter repercussões relevantes sobre os outros modos de transportes e exija um investimento relevante do poder público.

Por esta interação com outros modos de transporte urbano, as ações voltadas para a priorização da circulação do TCO exigem uma avaliação criteriosa dos impactos positivos e negativos na operação dos corredores urbanos para avaliar a eficiência e eficácia de cada configuração em análise. Para outras modalidades de transporte urbano, pode ser mais relevante a avaliação da magnitude dos investimentos exigidos e de sua integração com as demais modalidades de transportes (como seria o caso dos sistemas metroviários). Tendo em vista o compartilhamento do espaço viário e a natural concorrência pela capacidade viária entre o TCO e os demais modos de transporte rodoviário, a análise dos conflitos operacionais e a avaliação dos impactos não só sobre o TCO tornam-se particularmente relevantes.

A questão explorada ao longo da revisão bibliográfica apresentada neste capítulo trata de identificar aspectos críticos para a análise da operação de sistemas de transporte urbano (com enfoque nos modos rodoviários) e os principais pontos de pressão que surgem para os tomadores de decisão em função dos conflitos operacionais destacados. Ainda, explora-se a presença de externalidades decorrentes da emissão de poluentes e seus efeitos na operação de sistemas de transportes.

De fato, deve-se reconhecer que a análise técnica usual muitas vezes ainda ignora os efeitos da poluição atmosférica – restringindo-se aos impactos sobre custos e tempos de viagem e, eventualmente, sobre receitas e custos de operação; sobre investimentos exigidos e seu financiamento; e sobre acidentes de trânsito. Mas, de forma clara, reconhece-se nesta dissertação que a preocupação crescente com a

sustentabilidade ambiental e social exige um foco mais amplo que destaca os efeitos da poluição atmosférica. Por esta razão, também são explorados, na revisão bibliográfica, modelos para representação da operação dos sistemas de transporte e dos impactos associados às emissões veiculares de poluentes (EVP) decorrentes da operação – iniciando-se no presente capítulo e seguindo ao longo da revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 3.

Desta forma, neste capítulo são discutidos conceitos básicos relativos à operação de sistemas de TCO, seguido de um panorama a respeito da evolução tecnológica destes sistemas no aspecto operacional. Em seguida, contempla-se a presença de externalidades associadas a operação de sistemas de transporte em decorrência das EVP, de modo a identificar recomendações para a avaliação de possíveis estratégias para a gestão do transporte urbano – com atenção especial aos sistemas de TCO, pelas razões supracitadas. A discussão apresentada no Capítulo 2 visa consolidar as fundações conceituais para a discussão desenvolvida no Capítulo 3, no qual são discutidos os métodos de análise e avaliação de sistemas de transportes e formas de se incluir na análise os impactos associados às EVP.

2.1. Discussão Introdutória

No senso comum dos planejadores de transportes, considera-se razoável proporcionar privilégios aos sistemas de TCO, por vezes em detrimento de outros modos de transportes, por estes representarem formas mais “eficientes” de transporte. O termo “eficiente” vem entre aspas pois o conceito de eficiência requer que se apresente a métrica associada à avaliação, e esclarece-se: naturalmente, os veículos de transporte coletivo são capazes de transportar mais passageiros sem solicitar adicionalmente na mesma proporção o sistema viário. Veículos usuais utilizados no TCO em contextos urbanos (i.e., de 12 metros de extensão) são capazes de carregar cerca de 80 passageiros e solicitam apenas cerca de 2 a 4 vezes mais o sistema viário, em relação a um veículo de passeio – relação tipicamente expressa através da

unidade *pcu*, ou *passenger car units* (unidades de veículos de passeio, em tradução livre, na qual o automóvel⁶ assume valor unitário por se tratar da unidade padrão).

Em adição ao grau de solicitação do sistema viário, pode-se citar como ganhos de eficiência as menores taxas de emissão de poluentes por passageiro*quilômetro transportado observadas no uso do TCO em relação a veículos de transporte individual por automóveis (TIA) (IEMA, 2019). Complementarmente, pode-se dizer que os ganhos de eficiência do TCO em relação ao transporte individual têm ainda um caráter adaptivo ao desenvolvimento das cidades: os custos sociais médios associados à operação de sistemas de TCO decrescem com a quantidade de usuários do sistema, havendo economias de densidade (JARA-DIAZ e GSCHWENDER, 2003), ao passo que no transporte individual usualmente observa-se uma tendência de crescimento exponencial dos custos sociais médios – o que se deve, principalmente, à presença de custos externos aos usuários relevantes à significativa sensibilidade destes custos externos à quantidade de usuários dos modos individuais de transporte (BIGAZZI e FIGLIOZZI, 2013).

Ainda que se observe uma ampla vantagem do TCO em relação ao TIA em termos de eficiência, é importante destacar alguns aspectos notáveis sobre esta comparação e como a mesma se dá. No que diz respeito ao uso da infraestrutura viária, por exemplo, merece destaque o fato de que, ainda que veículos de TCO tenham uma maior produtividade em termos de passageiros transportados por *pcu*, ambos são expostos aos mesmos congestionamentos incidentes sobre o sistema de tráfego, em condições ordinárias nas quais as vias e faixas de tráfego são compartilhadas por ambos. Em termos práticos, ainda que ônibus sejam mais eficientes no transporte de passageiros, congestionamentos porventura ocasionados por excesso de automóveis numa dada via também incidirão sobre os ônibus, ocasionando atrasos e reduzindo a produtividade também do TCO (e vice-versa).

⁶ Para desambiguação, esclarece-se o termo “automóvel” refere-se a veículos de quatro rodas, exclusivamente. Ainda que alguns autores enquadrem veículos de 2 rodas sob a mesma terminologia, estes são referidos especificamente por “motocicletas”, sempre que citados, para que a distinção ao longo do texto seja estabelecida de forma simples.

Diversos estudos exploram a interferência operacional de modos individuais sobre modos coletivos e formas de mitigar tais interferências em favor do TCO dentro da visão mais ampla da Engenharia e da Economia. Como exemplos iniciais: Guevara et al. (2011) buscam otimizar a gestão de tráfego no sistema de transportes de Santiago, Chile, levando em conta o caráter heterogêneo do tráfego não só em termos veiculares mas em termos das distintas ocupações dos veículos de TCO e TIA – visando avaliar o desempenho do sistema explicitamente ao nível dos usuários, em vez de ao nível do tráfego de veículos motorizados. Basso et al. (2011) avaliam diversas tipologias de intervenções sobre um sistema de transportes bimodal (e.g., contendo TCO e TIA como alternativas) – dentre elas a alocação de prioridade de circulação a veículos de TCO, a fim de maximizar o bem-estar dos usuários do sistema de transportes. Intervenções desta natureza são discutidas em mais detalhe adiante no texto (ver seções 2.2, 2.3.3 e 4.1.1).

Ainda em relação a aspectos práticos da operação de sistemas de transporte, cabe destacar que a vantagem competitiva do TCO sobre o TIA aparenta-se ampla, se posta nos termos apresentados no primeiro parágrafo desta seção, mas esta vantagem é limitada ao levar-se em conta um contexto operacional mais realista: ainda que um ônibus padrão seja capaz de transportar 80 passageiros ao mesmo tempo, o carregamento de um serviço de TCO muito raramente mantém-se constante ao longo de todo o trajeto. Alternativamente, é comum observar-se um perfil variável ao longo do percurso, com a ocupação máxima sendo alcançada apenas em parte do percurso, conforme ilustrado no exemplo genérico da Figura 2.1

Figura 2.1: Exemplo genérico de perfil de carregamento de serviço de TCO

Fonte: Elaborado pelo autor

Notadamente, a característica ilustrada reduz o aproveitamento da capacidade de sistemas de TCO, devido à necessidade de dimensionar sua oferta para a seção de maior demanda ao longo trajeto (usualmente referido por “trecho crítico”). Ainda que o perfil de ocupação efetivo possa variar substancialmente em redes de TCO complexas, e que haja um esforço de planejadores de transportes para desenhar sistemas de modo a mitigar tais perdas de eficiência (e.g., como em sistemas tronco-alimentados), são recorrentes os cenários de ocupação urbana com menores densidades em periferias, núcleos atratores de viagens aglomerados em áreas específicas das manchas urbanas e configurações de ocupação urbana que contribuam com perfis de carregamento pouco homogêneos ao longo dos percursos de serviços de TCO.

Tendo isto em vista, os indicadores operacionais usados desde comparativos de eficiência até avaliações econômicas de projetos devem, portanto, abranger de forma sistêmica o desempenho operacional aproveitável (ou médio) do TCO, em vez de analisá-lo localmente, para que seu desempenho seja devidamente representado e avaliado. No exemplo genérico apresentado na Figura 2.1, a utilização do serviço, isto é, a quantidade de passageiros*quilômetro transportados (referido por “capacidade aproveitada”) é 1285 pax*km, ainda que o serviço fictício tenha percorrido 23 quilômetros e tenha capacidade para carregar 80 passageiros simultaneamente (i.e., 1840 pax*km de capacidade, 43,2% superior ao valor transportado), o que implica

uma ocupação média de 55,9 pax (i.e., uma redução de aproveitamento de 30,2% em relação à capacidade nominal de 80 pax).

Em alguns contextos, a medida de oferta de transportes (no texto acima, referido pelo termo “pax*km de capacidade”) possui uma unidade convencionada para ser expressada, como no contexto do transporte aéreo, no qual se utiliza frequentemente a métrica de assentos*km. Uma transferência direta deste para o contexto do TCO não é tão simples, pois no contexto do transporte urbano por ônibus, amplamente menos regulado que o transporte aéreo de passageiros, passageiros viajam tanto em pé quanto sentados (especialmente nas condições consideradas para fins de dimensionamento, isto é, a plena ocupação). Ao longo da dissertação se adotará, então, as definições empregadas por Vuchich (2005), que se refere a este parâmetro por capacidade ofertada (*offered capacity*, em tradução livre) em sistemas de TCO, medindo-o em espaços*km ou lugares*km, genericamente.

Vuchic (2005) apresenta também o termo *work utilization coefficient* (“coeficiente de utilização do oferta”, em tradução livre) para mensurar a razão entre capacidade utilizada (pax*km) e capacidade ofertada (lugares*km), o que se entende como um termo de conotação bastante técnica e de significado pouco intuitivo, que não será adotado. Para expressar tal característica, utiliza-se os termos “aproveitamento realizável da capacidade” (quando na etapa de planejamento) e “aproveitamento médio da capacidade” (quando relativo a indicadores operacionais), representados indistintamente pela variável ϕ_{ap} , conforme apresentado a seguir:

$$\phi_{ap} = \frac{\int_{x_0}^{x_f} ocup(x) * dx}{k_{bus} * (x_f - x_o)} \quad (2.1)$$

na qual,

ϕ_{ap} : aproveitamento realizável/médio da capacidade do serviço de TCO [adimensional]

x_0, x_f : marcos inicial e final do serviço de TCO [km];

$ocup(x)$: perfil de ocupação do veículo ao longo do percurso [pax];

k_{bus} : capacidade nominal do veículo [pax];

O termo “realizável” é empregado juntamente do termo “aproveitamento” em referência a limitações práticas impostas pelo ambiente urbano no qual se inserem

sistemas de TCO, impedindo que se consiga lançar mão da capacidade plena dos veículos de transporte coletivo – e referindo-se ao que se efetivamente consegue aproveitar da capacidade disponível⁷.

As tendências de polarização em aglomerações urbanas supracitadas, em detrimento de um maior balanceamento da distribuição das atividades urbanas, implicam a existência de regiões predominantemente produtoras de viagens, em dadas áreas da mancha urbana, e regiões predominantemente atratoras de viagens, em áreas distintas e potencialmente afastadas das primeiras. Este perfil de ocupação implica o conhecido caráter pendular de deslocamentos tipicamente observados nas grandes aglomerações urbanas no país e internacionalmente.

Tal configuração urbana tende a ocasionar serviços de transporte público que tenham carregamento próximo da capacidade disponível apenas em uma direção, impondo algum grau de ociosidade e, logo, ineficiência ao percurso na direção oposta,

⁷ Complementarmente à introdução do parâmetro “aproveitamento médio da capacidade”, deve-se trazer à discussão um outro aspecto importante para a economicidade do serviço de transporte coletivo que é normalmente associado ao conceito de renovação de passageiros. Ao longo de um trajeto do veículo de TCO, um mesmo lugar pode ser utilizado por mais de um passageiro quando o desembarque do passageiro anterior ocorre antes do embarque do passageiro seguinte. Este fenômeno é usualmente descrito pelo parâmetro “índice de renovação de passageiros” (ou apenas “índice de renovação” – IR). Seu cálculo é dado por:

$$IR = \frac{\text{total de passageiros transportados}}{\text{ocupação máximiz}}$$

Nota-se que o cálculo do IR envolve medidas de demanda em passageiros (ou embarques), ao passo que o cálculo do aproveitamento médio ϕ_{ap} envolve medidas de demanda em passageiros*quilômetro. Por tal razão, os parâmetros têm aplicações distintas. O emprego proposto de ϕ_{ap} se dá no momento em que se deve relacionar a quantidade de passageiros*quilômetro viajados e a quantidade de veículos*quilômetro a serem percorridos no atendimento a esta demanda. Em particular, a relação entre PKM e VKM no TCO é relevante em análises de impacto posto que parte relevante dos custos financeiros e sociais são associados aos volumes de VKM viajados, em vez de serem diretamente vinculados ao volume de PKM. Destaca-se que, em tal âmbito, a relação proporcionalidade entre PKM e VKM no TCO é descrita suficientemente pelo parâmetro ϕ_{ap} , não sendo necessário contemplar o IR em tais análises.

afetando o aproveitamento da capacidade na operação como um todo. Este efeito representa mais uma dimensão da operação de sistemas de TCO que deve ser contemplada para uma avaliação precisa de impacto do emprego do TCO como alternativa ao TIA. Em continuidade ao exemplo numérico apresentado na Figura 2.1, num contexto fictício em que a demanda no sentido oposto da linha atinja 50% do carregamento no sentido mais carregado, a eficiência real do serviço passaria a 41,9 pax*km, uma redução de 47,6% em relação à capacidade potencial (ou nominal) – i.e., implicando que $\phi_{ap} = 52,4\%$.

Com efeito, em análises de impacto decorrentes da migração modal entre TIA e TCO, não é razoável considerar que 1 VKM de uma viagem por automóveis possa ser substituída por $\frac{1}{k_{bus}}$ VKM. Uma abordagem mais realista consiste em introduzir o parâmetro ϕ_{ap} na relação, de modo que a proporcionalidade entre as métricas (indicada por “:” em vez de por “=”) seria dada conforme a equação (2.1). Na mesma, são usados os índices “car” e “bus” junto de VKM para indicar a qual modo se refere a métrica, utilizando-se “car” para o TIA e “bus” para o TCO.

$$1 \text{ VKM}_{car} : \frac{1}{\phi_{ap} * k_{bus}} \text{ VKM}_{bus} \quad (2.2)$$

No aspecto energético, mais intimamente vinculado a EVP, a provocação pode ser especialmente válida: Vasconcellos (2006) apresenta estimativas de consumo energético por modo (por pax*km transportado), considerando veículos completamente carregados, nos termos do autor. As estimativas indicam uma proporção 1:4,7, de ônibus comum para automóveis (i.e., um consumo energético de $\frac{1}{4,7}$ por passageiro*quilômetro, ou 21,3%, dos ônibus em relação a automóveis). Considerando a faixa de valor de eficiência real ilustrada acima (i.e., 47,6%), a proporção entre os consumos energéticos reais por pax*km seria de 1:2,2. Por outro lado, à medida que o uso compartilhado não-simultâneo de automóveis consolidar-se como a alternativa principal de usuários de TIA (como os serviços de transporte privado sob demanda alternativos ao táxi, conhecidos por *ride-hailing*), a proporção de consumo energético tenderia a aproximar-se novamente da relação apresentada por Vasconcellos (2006) pelas mesmas razões – isto é, passaria a existir ociosidade relevante também no TIA.

Ainda em relação à estimativa apresentada acima, há que se observar que, aparentemente, as estimativas de consumo energético fornecidas por Vasconcellos (2006) consideram automóveis com todos os assentos ocupados, o que tende a subestimar o consumo energético em 3 a 4 vezes, em relação a ocupações típicas observadas (i.e., da ordem de 1,5 passageiro por veículo, sendo usualmente menores em horários de pico). Há que se considerar, entretanto, que fora dos períodos-pico, os serviços de TCO não são dimensionados com base nos mesmos carregamentos críticos, mas usualmente sujeitados ao atendimento de frequências mínimas segundo os padrões de nível de serviço almejados (que tendem a implicar carregamentos por veículo inferiores e, logo, aproveitamentos médios menores). Isto pode reduzir ainda mais a eficiência dos serviços de TCO no arranjo operacional praticado como um todo, uma vez que há muito mais horas fora dos períodos-pico que nos períodos-pico em si. Adicionalmente, a proporção relativa entre modos, no âmbito das emissões de poluentes, não adere completamente à observada no consumo energético, divergindo em maior ou menor grau de acordo com o poluente em questão, o que pode gerar grandes impactos no resultado de análises comparativas entre os modos.

Por fim, a interação efetiva com os outros modos de transporte que compartilham (e naturalmente disputam) o espaço viário pode produzir efeitos distintos dos usuais em segmentos viários nos quais haja espaços exclusivamente dedicados ao transporte coletivo (e.g., faixas exclusivas para circulação e/ou ultrapassagem). Em casos em que gargalos de capacidade relevantes são ocasionados aos demais modos de transporte rodoviário, a medida ótima de preferência a ser alocada ao TCO pode ser restringida sob o prisma do benefício líquido resultante aos usuários do sistema de transporte urbano, numa visão mais ampla, devendo os impactos positivos e negativos serem avaliados e ponderados com rigor para informar os tomadores de decisão.

2.2. Evolução Tecnológica na Operação de Sistemas de Transporte Coletivo por Ônibus

Sistemas de TCO podem ser encontrados em diversas cidades pelo mundo, mas seu papel como principal modo de transporte coletivo urbano é predominante de forma preponderante em cidades da América Latina. É também atribuída à América Latina,

e em especial ao Brasil, papel de destaque no desenvolvimento tecnológico da operação de sistemas de TCO (e.g., CET, 1978; EBTU, 1983) e no pioneirismo da implantação de sistemas de TCO como sistemas de transporte de massa (DENG e NELSON, 2011) em corredores de média capacidade, em São Paulo (CET-SP, 1978), e alta capacidade, em Curitiba (ITDP, 2008) – tecnologia que viria a atingir seu ápice ao final do século XX, no sistema Transmilenio, implantado na cidade de Bogotá: a rede de corredores de ônibus de mais alta capacidade na atualidade, capaz de superar a marca de 45.000 passageiros transportados por hora em um único sentido (DENG e NELSON, 2011).

As configurações operacionais que permitem tais elevados níveis de capacidade aos sistemas de TCO foram consolidadas em uma tecnologia denominada *Bus Rapid Transit* (BRT), que se vale fundamentalmente da priorização de circulação e de ganhos de eficiência nas operações de docagem (do inglês, *docking*, em tradução livre), embarque e desembarque, além de um conjunto de melhorias operacionais e de experiência do usuário complementares, para atingir e manter regularmente um elevado nível de serviço. Sua evolução não se desenvolveu, entretanto, apenas na direção de conceber sistemas de alta capacidade – enquanto almejando menores custos de investimento e operacionais que modos baseados em trilhos (e.g., DENG e NELSON, 2011; TIRACHINI et al., 2010) – mas também na direção de ampliar a aplicabilidade de sistemas de TCO em estágios intermediários de nível de serviço e sofisticação, como aqueles baseados apenas na provisão de faixas exclusivas ou preferenciais. A evolução do desenho operacional de sistemas de ônibus é discutida em mais detalhes nos itens a seguir, com enfoque aos aspectos relevantes ao problema da presente pesquisa.

2.2.1. Priorização de circulação ao TCO por meio de faixas exclusivas

Conforme discutido no início deste capítulo, distintos modos de transporte rodoviário possuem diferentes níveis de eficiência, bem como diferentes padrões de resposta a crescentes níveis de demanda – em particular, referindo-se ao contraste entre TCO e TIA, os dois modos rodoviários predominantes em São Paulo (DPETM-SP, 2013) e, de modo geral, nas grandes cidades brasileiras.

A visão de estabelecer faixas de circulação exclusivas para ônibus pode remontar à década de 1960 (ITDP, 2008). Ainda que haja registro de discussões sobre vias

exclusivas de transporte por ônibus a partir de 1937, quando a cidade de Chicago delineou planos para converter linhas férreas em corredores exclusivos de TCO, o conceito de “faixas de ônibus” no sentido mais carregado de tráfego, buscando limitar a interferência de congestionamentos sobre os serviços de TCO, foi pioneiramente experimentado em Paris, em 1964 (ITDP, 2008).

Houve registros de uma série de faixas exclusivas de ônibus (FEO) em países desenvolvidos nos anos seguintes, com boa parte dos casos de implementações tratando-se de vias novas e/ou substituição a vias férreas desativadas (ITDP, 2008). Todavia, estes cenários diferem dos contextos tipicamente observados em países em desenvolvimento, nos quais a ineficiência no planejamento e a limitação de recursos faz com que as FEO sejam demandadas e implementadas em áreas urbanas e vias de uso e ocupação já consolidados.

Cabe destacar que tal contexto impõe restrições de espaço e, conseqüentemente, a incidência de conflitos mais profundos entre a operação de modos rodoviários, posto que implementações de FEO nestes cenários potencialmente consumam espaços originalmente utilizados por outros modos rodoviários além do TCO. Isso requer que avaliações de projetos desta natureza contemplem não só impactos sobre os modos privilegiados (i.e., o TCO, em casos de FEO) mas também sobre os modos preteridos (e.g., TIA) de forma precisa para que a tomada de decisão seja devidamente informada.

Adiante na linha cronológica, a partir de 1974, incentivada pela bem-sucedida experiência do recém-inaugurado eixo estrutural de Curitiba, a implantação de FEO expandiu-se nacionalmente, com implementações pioneiras nas cidades de São Paulo, Goiânia, Porto Alegre e Belo Horizonte logo nos anos seguintes (MEIRELLES, 2000). A partir disso, a experiência brasileira consolidou-se não só no que diz respeito ao estado da arte de sistemas de BRT, mas também no âmbito de melhorias operacionais parciais e progressivas na malha de corredores de TCO visando promover ganhos de eficiência enquanto lidando com os desafios supracitados.

O caso da RMSP é o principal representante deste segundo grupo de experiências no Brasil (MEIRELLES, 2000). Desde as primeiras iniciativas na década de 70 até o presente, são mais de 500 km de FEO implantadas, sendo parte predominante destas configuradas como faixas exclusivas de tráfego à direita (i.e., ao lado dos passeios),

sem segregação física (CET-SP, 2013). Em adição à reserva de viário para circulação do TCO, nos anos seguintes também se desenvolveu no país, e especialmente na RMSP, tecnologias de planejamento operacional que visassem ganhos de capacidade e velocidade nos sistemas de TCO, descritas a seguir.

Já na década de 70, observava-se em órgãos planejadores uma discussão profunda sobre configurações que possibilitassem um melhor aproveitamento da infraestrutura disponível através de intervenções majoritariamente operacionais. O Boletim Técnico nº 09 da CET-SP (1978) apresenta uma discussão extensiva sobre capacidade destes sistemas, identificando as paradas de embarque e desembarque como principais gargalos operacionais para o TCO (em detrimento das interseções, como no caso do TIA), uma vez que o tempo de atendimento nas paradas – da ordem de 20 segundos por ônibus parado simultaneamente, e diretamente proporcional ao número de embarques e desembarques – é algumas vezes superior ao tempo de atendimento em interseções (CET-SP, 1978).

No referido Boletim são abrangidas, por exemplo, alternativas como a variação da quantidade de paradas e o escalonamento de paradas atendidas, além de identificada a necessidade de faixas de ultrapassagem em paradas sobrecarregadas, tanto para ganho de capacidade como para a devida organização dos serviços no interior das paradas. Adicionalmente, neste boletim é descrita e avaliada a tecnologia de operação em comboios de ônibus ordenados (conhecida por COMONOR), desenvolvida localmente visando aumentar a capacidade em paradas de ônibus (i.e., em termos de ônibus por hora) sem a necessidade de implementação de faixas de ultrapassagem no entorno destas.

A solução permitiu, no Corredor 9 de Julho-Santo Amaro, o atendimento da ordem de 1000 pax/hora/sentido/parada com um fluxo de 300 ônibus/hora em segmentos nos quais a capacidade ora limitava-se em 240 ônibus/hora durante tais picos de demanda (CET-SP, 1978). A operação baseada em COMONOR, todavia, oferecia ganhos de capacidade limitados e requeria um grande rigor operacional, cuja constância era dificilmente atingida e mantida – e.g., no início da implementação, o descumprimento na formação dos comboios era da ordem de 8%, limitando a apropriação dos potenciais ganhos de capacidade. Logo, soluções alternativas passaram a ser concebidas e implementadas.

Nos anos seguintes, a implantação de terceiras-faixas (em adição às faixas exclusivas dedicadas a cada sentido de circulação, no caso de FEO situadas junto ao eixo central das vias) passou a ser praticada, reservando espaço viário ao TCO também para manobras de ultrapassagem e proporcionando ganhos superiores de capacidade em relação à operação com COMONOR (MEIRELLES, 2000). Tal evolução fez com que o mesmo Corredor 9 de Julho/Santo Amaro fosse considerado um dos mais eficientes de seu tempo, no início da década de 90 (GARDNER et al., 1991, *apud* MEIRELLES, 2000). Neste mesmo período, passaram a ser implementadas melhorias adicionais no sistema de TCO na cidade, como plataformas elevadas ao nível do piso dos ônibus (em corredores ao centro das vias); veículos com portas dos dois lados, permitindo a operação destes em distintos tipos de via; o redesenho da malha de serviços de TCO, para uma operação tronco-alimentada; e o emprego de veículos de maior capacidade, como ônibus articulados. Esses elementos foram inicialmente experimentados, praticamente em sua totalidade, no então recém-inaugurado Corredor Vila Nova Cachoeirinha (MEIRELLES, 2000; CASTRO, 2008).

Nos anos subsequentes, tais melhorias foram contempladas em projetos de corredores novos e replicadas em corredores existentes, proporcionando um processo contínuo de expansão de capacidade no sistema de TCO na RMSP. Dentre estas, estão presentes inclusive intervenções mais profundas e impactantes como a implementação de faixas de ultrapassagem em corredores existentes – destacando-se que nestes casos tal intervenção usualmente representa a subtração de uma faixa de rolamento do TIA e do tráfego comum em geral, como no caso ilustrado na Figura 2.2 e na Figura 2.3 (na pista sentido Leste-Oeste).

Figura 2.2: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (sem faixa de ultrapassagem, em 2017)

Fonte: Google Earth (imagem), com anotações do autor

Figura 2.3: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (com faixa de ultrapassagem, em 2018)

Fonte: Google Earth (imagem), com anotações do autor

Neste caso, nota-se que juntamente da implementação da faixa de ultrapassagem foi implementada uma extensão da parada de ônibus, que atualmente opera com duas sub-paradas independentes. Mais detalhes sobre o contexto e aspectos técnicos

desta implementação são apresentados e discutidos na seção 4.1.3, uma vez que o exercício analítico da pesquisa se baseia neste cenário como contexto.

Sumarizando o conteúdo deste item, cabe a ressalva de que grande parte das melhorias implementadas sobre o sistema de TCO na RMSP já estavam presentes no sistema de BRT implementado em Curitiba anteriormente, isto é, já eram conceitualmente disponíveis. O ponto notável do caso da RMSP, portanto, não é puramente tecnológico, mas dá-se em sua característica adaptiva: as intervenções foram implantadas conforme a demanda do sistema vigente era superada (ou, porventura, posteriormente a isso), e adaptava-se à disponibilidade de espaço e recursos (tipicamente inferior à ideal) em cada contexto.

Este cenário é recorrente em países em desenvolvimento e, portanto, compõe o enfoque da presente pesquisa. Em particular, nota-se que estudos com enfoque no planejamento operacional de sistemas de TCO e sua interação com o tráfego comum (e.g., JARA-DIAZ e GSCHWENDER, 2003; BASSO et al., 2011; BASSO e JARA-DIAZ, 2012) consideram simplificações na representação de aspectos operacionais (e.g., comportamentos lineares em função da demanda; a capacidade das FEO é calculada com base na capacidade das faixas de tráfego, em vez de nas estações) que não permitem a captura das interações necessárias para a devida avaliação desta natureza de intervenções. Este aspecto da operação, em particular, será detalhado no modelo analítico empregado na presente pesquisa a fim de propiciar maior consistência aos resultados obtidos, baseando-se numa representação mais detalhada das nuances operacionais, como realizado por CET-SP (1978), Fernández et al. (2002), Szász (1995) e Pietrantonio (1997) – ainda que este último tenha concluído que, naquele contexto, as simplificações usualmente empregadas se mostraram adequadas, ao permitirem a obtenção conclusões similares às obtidas utilizando-se modelos mais detalhados.

No item seguinte são contempladas as evoluções tecnológicas na operação de sistemas de TCO que compõem o conceito de BRT, discutindo-se o conceito e aspectos contextuais de sua implantação no país. A compreensão do conjunto de elementos em que consiste o conceito de sistemas BRT é de particular interesse, no âmbito no problema da pesquisa, pois proporciona diretrizes à evolução progressiva

e adaptiva de sistemas de TCO já implementados nas cidades, bem como ao desenho de intervenções nestes sistemas.

2.2.2. Sistemas de Bus Rapid Transit (BRT)

Ao introduzir-se o conceito de sistemas de BRT, identifica-se como crítico distingui-lo do conceito de corredores viários exclusivos ao TCO. Ainda que FEO possam ser consideradas o elemento fundamental de sistemas de BRT, destaca-se que o projeto de sistemas de BRT apoia-se diretamente no planejamento operacional destes sistemas, e que é a partir do plano operacional que se dá a concepção de elementos infraestruturais que permitam que o plano operacional se realize apropriadamente.

O ponto a ser destacado é que o conceito de BRT não se inicia, tampouco se limita, no planejamento dos elementos físicos. O conceito implica um desenho da infraestrutura que baseia-se em, e que permita, o atendimento aos parâmetros de desempenho operacionais estabelecidos a partir do conceito de sistemas de transporte em massa de passageiros por ônibus (e.g., taxas de embarque/desembarque de passageiros por segundo; capacidade de estações de embarque e desembarque; regularidade dos tempos de partida e dos tempos de viagem).

Um segundo contraste conceitual relevante, mais formal, é a do conceito de BRT com os sistemas de BRT em si. No presente texto, trata-se do conceito de BRT como representando o estado da arte em planejamento de sistemas de TCO de alta capacidade, o que necessariamente inclui um conjunto de elementos que permitem ganhos de capacidade ao sistema (e.g., faixas de ultrapassagem, pagamento desembarcado de tarifas – mais discutidos adiante nesta seção). Por outro lado, a ausência de alguns destes elementos em sistemas e corredores de TCO não impede que estes sejam enquadrados, em termos práticos, como sistemas de BRT. Enquanto o Manual de BRT (ITDP, 2008) cita o sistema de BRT de Curitiba como o pioneiro e um dos mais sofisticados no mundo, a RMSP é citada como contendo o maior sistema de BRT implantado (em termos ambos de extensão e passageiros transportados), ainda que haja um déficit considerável da infraestrutura dos corredores de BRT da RMSP quando comparados aos de Curitiba.

Em *The BRT Standard* (ITDP, 2016) é proposto um sistema de avaliação que relaciona a configuração de cada dimensão-chave do sistema de TCO (e.g.,

mecanismo de coleta de tarifa, grau de preferência de circulação) a níveis de pontuação que, ao final, permite uma avaliação global da qualidade operacional do sistema, enquadrando-o como padrão Ouro (mais alto), Prata, Bronze ou Básico (ou não enquadrando-o como sistema de BRT) com base na pontuação total. A título de exemplo, três cidades no país possuem BRTs classificados no padrão Ouro: Belo Horizonte (Move), Curitiba (Linha Verde) e Rio de Janeiro (TransCarioca), segundo o portal brtdata.org (BRT+ CoE, 2019). Em São Paulo, o padrão da ampla maioria dos corredores é considerado inferior à classe Bronze.

Com efeito, publicações como *The BRT Standard* (ITDP, 2016) não só estabelecem referências para o desenho destes sistemas, mas reconhecem que projetos com alguns elementos dimensionados de forma sub-ótima ainda assim promovem ganhos de eficiência relevantes. Isto corrobora com a necessidade de que níveis intermediários de qualidade sejam progressivamente perseguidos por planejadores, em cenários e contextos nos quais a implementação do projeto ideal não seja viável.

Novamente, esta visão é especialmente pertinente a grandes aglomerações urbanas de países em desenvolvimento. Por um lado, nestes contextos já se observa sistemas de TCO consolidados, em plena operação e com níveis elevados de demanda – estes, devidos aos níveis reduzidos de renda média e aos elevados índices de concentração de renda tipicamente presentes. Por outro lado, o desenvolvimento urbano já consolidado impõe conflitos espaciais e operacionais, limitando as alternativas de desenho dos sistemas de TCO. Em particular, o estudo de caso da evolução do sistema de TCO em São Paulo reflete um abrangente exemplo de aprimoramento operacional de sistemas de TCO com investimentos e interferências sobre o ambiente construído limitadas. Conforme citado no item anterior, tal caso é retomado e explorado em maior nível de detalhes durante os exercícios analíticos desenvolvidos no escopo da presente pesquisa (Capítulo 4)

2.2.2.1. Principais componentes de sistemas de BRT

Baseando se em publicações como *The BRT Standard* (ITDP, 2016) e *Manual de BRT* (ITDP, 2008; ITDP, 2017), bem como em revisões sobre a tecnologia de BRT na literatura científica internacional (DENG e NELSON, 2011) e com enfoque na experiência brasileira (CASTRO, 2008), é possível consolidar os componentes

básicos de sistemas de BRT, que visam proporcionar ganhos de eficiência operacional e aumento de capacidade dos corredores, como sendo os seguintes:

- Faixas exclusivas de circulação, localizadas junto ao eixo central das vias;
- Faixas de ultrapassagem junto a estações;
- Tratamento prioritário em interseções e no controle semafórico;
- Pagamento / validação de ticket desembarcado;
- Plataformas bem condicionadas e com piso no mesmo nível dos ônibus;
- Rotas operadas com baixo intervalo entre serviços e veículos com alta capacidade;
- Variedade de serviços, como rotas expressas e rotas locais (paradoras);

Nota-se que, dentre os sete componentes citados, os três primeiros fazem com que sistemas de BRT em evolução em áreas urbanas de ocupação consolidada compitam por espaço e capacidade no sistema viário diretamente com o TIA e demais modos rodoviários. A identificação destes principais componentes se faz relevante, no âmbito da presente pesquisa, uma vez que se busca investigar o potencial de aplicação de melhorias operacionais sobre sistemas de TCO como estratégias de mitigação de EVP. Dada as limitações de espaço citadas, faz-se necessária a estruturação de métodos de avaliação de projetos que proporcionem a compreensão dos principais impactos destas intervenções não somente sobre o sistema de TCO mas também sobre outros modos de transporte e sobre o ambiente no qual o sistema de transportes se insere, a fim de permitir a valoração dos efetivos benefícios e prejuízos de potenciais intervenções desta natureza sobre os sistemas de TCO.

2.3. Externalidades de Sistemas de Transporte Associadas a Poluentes Atmosféricos

Na avaliação de projetos no contexto dos sistemas de transporte urbano, é necessário compreender o impacto esperado tanto sobre o desempenho do sistema quanto sobre o ambiente no qual o sistema se insere – estes, os chamados efeitos externos, também externalidades⁸. Vasconcellos (2006) cita a definição teórica de Verhoef (1994) sobre efeitos externos, reproduzida abaixo:

⁸ É possível encontrar, em algumas áreas de conhecimento, distinção entre os termos “externalidade” e “efeito externo”. No presente texto, os termos são empregados de forma equivalente e intercambiável.

Um efeito externo ocorre quando a função-utilidade de um agente [...] contém uma variável cujo valor real depende do comportamento de outro agente, o qual não leva em consideração seu efeito [ou “implicação”] do seu comportamento no seu processo de decisão. (VERHOEF, 1994).

A definição acima destaca o caráter não-doloso das externalidades e de sua ocorrência. As implicações da presença de externalidades no sistema de transportes e mais detalhes sobre o porquê agentes não consideram efeitos externos em sua tomada de decisão – bem como mecanismos para estimulá-los a considerarem, i.e., métodos para internalizar os efeitos externos – são discutidos no item 2.3.3. No que diz respeito a efeitos ambientais de projetos de transporte, as principais fontes de externalidades mapeadas são (DfT, 2019):

- Ruídos;
- Má qualidade do ar local;
- Gases de efeito estufa (GEE); e
- Impactos sobre o capital ambiental (e.g., corpos d’água, paisagens, biomas).

Nota-se que boa parte dos efeitos elencados está associada à emissão de poluentes atmosféricos. A compreensão sobre a extensão destes efeitos externos mostrou ser necessário incluir nestas avaliações não só externalidades na escala local (associadas à qualidade do ar), mas também em escala global (associadas a mudanças climáticas).

Os itens seguintes abrangem os fenômenos por meio dos quais se manifestam as externalidades associadas a emissões de poluentes atmosféricos (particularmente gerados pelo transporte urbano), seguidos de uma exploração conceitual de possíveis abordagens visando a mitigação destes impactos.

2.3.1. Mudanças climáticas: Efeitos em escala global

Considerando-se a escala global, o transporte urbano exerce efeito direto sobre o clima terrestre, devido à queima de combustíveis fósseis e biomassa. Nesta seção, é sumarizado o ciclo através do qual as emissões de poluentes atmosféricos

interferem no equilíbrio climático, desenvolvido integralmente⁹ com base em publicações do IPCC (2013; 2014), que oferecem um compêndio acerca do conhecimento produzido e consolidado a respeito da interferência antropológica sobre o clima terrestre, sendo também referência básica de publicações nacionais sobre esta temática (e.g., MACEDO, 2014).

O sistema climático é definido por uma série de componentes, dos quais destaca-se a atmosfera como o mais instável. A composição atmosférica tem papel central na determinação do clima global, e apesar de presentes na atmosfera apenas como traços, gases como dióxido de carbono, metano, óxido nítrico e ozônio são os principais responsáveis pela absorção e emissão de radiação infravermelha. Estes compostos, conhecidos como gases do efeito estufa (GEE), exercem influência direta sobre o balanço de energia térmica no planeta, levando a um aumento de temperatura nas camadas próximas à superfície terrestre. Dentre eles, o ozônio apresenta características peculiares, dignas de maior exploração. Este gás, quando próximo à superfície terrestre, atua como um GEE, ao passo que em camadas atmosféricas superiores tem como propriedade a absorção da radiação ultravioleta, de maneira a filtrar esta forma de radiação potencialmente nociva. Outro fator de destaque é seu curto ciclo de vida na atmosfera, fator que efetivamente limita seu impacto enquanto GEE.

Alterações climáticas, tanto em termos médios quanto relacionadas a eventos extremos, ocorrem naturalmente – o que pode ser comprovado pelos períodos glaciais e interglaciais que vêm se alternando no planeta há aproximadamente um milhão de anos. Comparativamente, os últimos 10.000 anos apresentavam-se climaticamente estáveis e inclusive com uma tendência ao resfriamento, até meados do século XX.

Apesar da característica cíclica e natural das alterações climáticas, o IPCC argumenta que o aquecimento global observado desde o século XX é sem precedentes no milênio e é consequência direta da ação antrópica. Desde o início da revolução industrial o impacto da ocupação humana vem ganhando maiores proporções e sumariamente atingindo uma escala global. Atividades humanas envolvendo a queima de combustíveis fósseis e biomassa, como o transporte urbano,

⁹ Excedo quando especificamente referenciada fonte complementar.

levam à produção de gases do efeito estufa e aerossóis, alterando a composição da atmosfera terrestre. Como exemplo é possível citar o dióxido de carbono, cuja concentração atmosférica aumentou em 30% desde o início da revolução industrial e segue aumentado a uma taxa média de 0,4% ao ano. Esta drástica alteração é comprovadamente antropogênica, uma vez que foram detectadas mudanças na composição isotópica do dióxido de carbono atmosférico, demonstrando-se que a origem do aumento estava relacionada à queima de combustíveis fósseis. Outro exemplo são os óxidos de nitrogênio e o monóxido de carbono, também emitidos no referido processo de combustão. Estes não são propriamente gases do efeito estufa, mas seu acúmulo leva um aumento da concentração de ozônio troposférico, ou seja, próximo à superfície, que por sua vez atua como GEE.

A maior concentração de gases do efeito estufa na atmosfera terrestre leva a uma maior retenção líquida de radiação infravermelha, gerando elevação substancial da temperatura média na superfície terrestre. A rigor, este efeito é reconhecido como um aumento do efeito estufa, uma vez que o efeito estufa em si é um fenômeno natural imprescindível para a manutenção de uma temperatura compatível com a vida na Terra.

O setor de transportes contribui consideravelmente para o aumento do efeito estufa, devido à grande liberação de GEE pelos meios de transportes de cargas e passageiros. Desde 1970, as emissões do setor dobraram e vem crescendo a uma taxa superior à de qualquer outro setor de uso final de energia (do inglês *energy end-use sector*, em tradução livre). Considerando-se o transporte urbano, enfoque desta dissertação, estima-se que 80% das emissões estejam relacionadas a veículos de transporte rodoviário e que 40% da energia utilizada pelo setor de transportes (majoritariamente proveniente de combustíveis fósseis) seja aplicada ao segmento urbano.

Apesar de sua grande relevância, a alteração na composição atmosférica relacionada à ocupação humana não se limita aos gases do efeito estufa. Os clorofluorcarbonetos (CFC) e compostos halogênicos não existiam naturalmente na atmosfera e foram inseridos por atividades antrópicas. Estes gases exercem dois efeitos de grande impacto sobre o clima global: são responsáveis pela depleção da

camada de ozônio estratosférica, permitindo maior incidência de radiação ultravioleta sobre a superfície terrestre, além de atuarem como importantes gases do efeito estufa.

Estes compostos, no entanto, são associados em menor escala com o transporte urbano, além de terem suas emissões em patamares controlados nos dias atuais, e, portanto, não serão contemplados na presente dissertação. O enfoque é atribuído aos principais poluentes emitidos por sistemas de transporte, conforme destacado em relatórios do IPCC (2013) e manuais de avaliação de projetos de transporte (e.g., DfT, 2019), a saber: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Cabe destacar que o ozônio não é incluído na seleção de principais poluentes (do ponto de vista da provocação de mudanças climáticas) devido ao seu curto ciclo de vida na atmosfera, conforme citado anteriormente.

2.3.2. Qualidade do ar: Efeitos em escala local

Uma revisão realizada pelo Health Effects Institute (HEI, 2010) analisou as evidências de associação entre a emissão veicular de poluentes e impactos sobre a saúde humana, como doenças cardiovasculares e respiratórias, alergias e câncer, tendo observado-se diversas evidências indicativas de correlação positiva. Verificou-se também que as zonas de exposição à poluição do ar associada ao tráfego veicular são as áreas localizadas dentro de um intervalo de 300 a 500 m de distância a eixos viários relevantes. O grande número de pessoas que residem dentro desta faixa de exposição em centros urbanos argumenta em favor de que a exposição à poluição proveniente do tráfego apresenta-se como uma questão de saúde pública (RIBEIRO, 2018).

Conforme mencionado, há duas décadas, as estimativas de perdas com a poluição do ar em áreas urbanas apontavam para custos sociais anuais da ordem de milhões de dólares anuais (MOTTA e MENDES, 1994), ao passo que estimativas recentes corrigem tais valores para patamares da ordem de bilhões de dólares (MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014). Destaca-se que apesar de a poluição atmosférica ter apresentado tendências de queda na última década, como apontado em relatórios de monitoramento (CETESB, 2015), a quantidade de internações e óbitos associados à qualidade do ar apresentou grande variação entre os estudos citados.

Segundo estimativas globais da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2014), 3,7 milhões de mortes puderam ser atribuídas à poluição do ar em 2012, dentre as quais

40% estiveram relacionadas com a doença cardíaca isquêmica, 40% com infarto e 20% relacionadas a câncer ou outras enfermidades no sistema respiratório.

A seguir apresenta-se a sumarização dos principais poluentes provenientes da operação do transporte urbano, do ponto de vista da qualidade local do ar, e aspectos contextuais destes relativos à RMSP. O conteúdo é baseado nas informações compiladas por Castro (2008) e complementado pontualmente com citações específicas. São eles:

- **Material Particulado (PM):** os veículos são tipicamente a principal fonte de PM em áreas urbanas. Na RMSP, são estimados como responsáveis por mais de 2/3 das concentrações de PM, com indicativos de que 45% das EVP de PM são emitidas diretamente, 23% são provenientes da formação de aerossóis de carbono secundários e 31% são fruto da ressuspensão de partículas da rua (CETESB, 1998, *apud* CASTRO, 2008). São associados a ocorrências de internações por doenças cardiopulmonares e, no caso do PM proveniente de motores à diesel, são identificados como agente cancerígeno. Sua relação com impactos sobre a saúde é explorada em maior grau de detalhe na seção 3.3.2.3;
- **Ozônio (O₃):** o ozônio é um poluente secundário, produzido a partir de transformações fotoquímicas de NO_x e compostos orgânicos voláteis (VOC) – estes também denominados gases orgânicos reativos. A relação NO_x/VOC de EVP é fundamental para explicar os níveis de [O₃]¹⁰. São considerados nocivos aos tecidos pulmonares, podendo causar problemas respiratórios agudos, reduzir o funcionamento pulmonar em adultos e comprometer defesas imunológicas. Por fim, destaca-se que o fato de este ser um poluente secundário contribui para que concentrações elevadas ocorram razoavelmente distantes das fontes de seus poluentes precursores (NO_x e VOC). Branco e Walsh (2005, *apud* CASTRO, 2008) observam fenômenos do gênero ao observar elevados níveis de [O₃] incidentes em medições próximas ao Pico do Jaraguá, na RMSP (a 1135m de altitude e sem fontes relevantes de poluentes em seu entorno), em níveis semelhantes a medições realizadas próximas ao Parque do Ibirapuera, no interior do centro expandido de São Paulo – destacando ainda que nos meses de maio a julho observam-se menores valores de [O₃], coincidindo com menores níveis de radiação solar incidentes sobre a cidade. Por fim, cita-se as evidências destacadas por Andrade et al.

¹⁰ A notação de elementos químicos entre colchetes refere-se à concentração destes elementos no meio em questão.

(2017) a respeito da ocorrência de picos de [O₃] aos fins de semana em áreas urbanas, períodos nos quais as emissões de NO_x usualmente são inferiores à média semanal.

- **Monóxido de Carbono (CO):** proveniente quase em sua totalidade de fontes móveis, e predominantemente por veículos do ciclo Otto (movidos à gasolina ou à álcool), o CO é produto da combustão incompleta de combustíveis. É um dos poluentes mais efetivamente afetados por políticas como o PROCONVE¹¹, tendo apresentado tendência constante de queda nas últimas décadas (CETESB, 2015). Ao ser inalado, o CO presente na atmosfera acessa as hemoglobinas e dificulta o transporte de oxigênio pelo sangue, implicando reduções momentâneas de capacidade motora e intelectual e sobrecarregando o sistema cardiorrespiratório, podendo implicar causalidades especialmente em indivíduos pertencentes a grupos de risco. Em grau contínuo de exposição, pode levar a óbito por asfixia química.
- **Óxidos de Nitrogênio (NO_x):** Produzidos predominantemente por veículos movidos à diesel, os NO_x são precursores do ozônio, conforme já discutido anteriormente, bem como do ácido nítrico, este sendo um dos causadores da chuva ácida. Enquanto poluente primário, estão associados ao agravamento de doenças respiratórias, especialmente em indivíduos com asma.
- **Compostos Orgânicos Voláteis (VOC):** Provenientes majoritariamente de fontes móveis do ciclo Otto, os hidrocarbonetos são também um dos principais precursores da formação de O₃, representando potencial de danos à saúde humana como irritação das vias respiratórias, leucemia e câncer pulmonar. São por vezes referidos por HC (hidrocarbonetos) ou NMHC (não-metano hidrocarbonetos), alternativamente.
- **Óxidos de Enxofre (SO_x):** As EVP de SO_x são diretamente relacionadas ao teor de enxofre presente na composição do óleo diesel. O controle da presença de enxofre nos combustíveis pode diminuir não somente as emissões de SO_x, mas também de PM, uma vez que os sulfatos representam uma importante fração destas partículas. Motta e Mendes (1994), apontam que os mesmos se encontram em situação controlada desde o final do século XX, representando desde então risco significativamente inferior aos demais poluentes elencados.

Dentre os poluentes mais nocivos à saúde humana, o DfT (2019) elenca como os principais poluentes primários emitidos pelos sistemas de transportes o material particulado (PM) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). A Organização Mundial da Saúde,

¹¹ Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, implantado no país em 1986, estabelecendo limites de EVP progressivamente mais restritivos para veículos novos desde sua implantação até o presente

por sua vez, destaca como principais poluentes, além dos anteriores, o dióxido de enxofre (SO₂) e o ozônio (O₃) troposférico (WHO, 2006). Destaca-se que o ozônio é classificado como um poluente secundário, visto que não é emitido diretamente pelo tráfego veicular, mas sim é originado a partir de reações químicas entre poluentes veiculares primários e o oxigênio atmosférico.

2.3.3. Arcabouço conceitual para mitigação de impactos ambientais na operação de sistemas de transportes

No que diz respeito à mitigação de externalidades negativas (e.g., congestionamentos e a emissão de poluentes atmosféricos) de sistemas de transporte urbano através de medidas operacionais, é possível buscar soluções principalmente em duas principais áreas de concentração, a saber: teoria econômica e engenharia de transportes. Aqui, destaca-se que nesta seção não são abrangidas estratégias baseadas em mudanças tecnológicas em veículos automotores, como o desenvolvimento de motores mais eficientes ou movidos a combustíveis alternativos, nem as baseadas em regulações aplicáveis às fontes diretas das externalidades, como a imposição de limites mais rigorosos de emissões veiculares (como a discutida em OLIVA, 2015), que naturalmente são medidas relevantes para tal fim.

O objetivo principal de se mitigar os efeitos decorrentes da presença de externalidades negativas nos sistemas de transporte é ampliar o bem-estar (ou benefício líquido, numa terminologia mais próxima das “análises de custo-benefício”) social, uma vez que a presença de custos externos aos usuários do sistema faz com que o equilíbrio de mercado falhe em convergir para a otimalidade social livremente.

O fato de que todos os custos associados com a operação do sistema de transporte não incida sobre os usuários e/ou que não seja plenamente percebida pelos mesmos faz com que estes tomadores de decisão optem pelo sobreuso do sistema e/ou de alguns de seus componentes (sob a ótica global), em níveis de demanda nos quais o benefício dos usuários se sobrepõe ou equipara apenas à parcela privada (isto é, incidente sobre cada usuário individualmente) percebida dos custos associados a seu uso. Sabe-se ainda que a parcela não-privada dos custos pode apresentar-se amplamente superior a sua contraparte privadas – situação que se agrava conforme o número de usuários no sistema aumenta e a demanda aproxima-se ou excede sua capacidade (BIGAZZI e FIGLIOZZI, 2013), podendo ocasionar níveis alarmantes de

perdas sociais e tornando urgente a intervenção por parte de governantes e órgãos responsáveis.

Ainda que o enfoque da pesquisa se dê, predominantemente, em soluções baseadas em métodos de Engenharia, convém abranger brevemente a visão advinda dos princípios da teoria econômica. Duas linhas destacam-se como as estratégias de mercado mais clássicas para internalização de externalidades: a cobrança do imposto Pigouviano (cuja proposição é atribuída à PIGOU, A. C., em sua publicação *The Economics of Welfare*, de 1920, segundo GUEVARA et al., 2011), que consiste em introduzir uma cobrança aos consumidores equivalente à diferença entre custos marginais social e privado (o primeiro superior ao segundo, no contexto de externalidades negativas) no ponto de consumo ótimo social; e o estabelecimento de direitos de propriedade sobre os efeitos externos sendo gerados (COASE, 1960), voltada ao estabelecimento de estruturas de mercado que, por construção, contemplem e internalizem os custos ora externos, de modo que o mesmo convirja naturalmente a condições de equilíbrio entre oferta e demanda socialmente eficientes.

No contexto de sistemas de transporte, tratamentos alinhados ao conceito do imposto Pigouviano vem sendo considerados há várias décadas, desde uma das primeiras menções de cobranças em sistemas de transporte como ferramenta de política de transportes (VICKREY, 1963), a fim de dirigir o comportamento da demanda em direção ao ótimo social, até a implementação dos sistemas conhecidos como “pedágios urbanos” existentes na atualidade, como em Cingapura, Londres e Estocolmo. Abordagens mais alinhadas à visão de Coase (1960) começaram a ser esboçadas no fim do século passado (e.g., VERHOEF et al., 1997), na forma do que é usualmente conhecido como *tradeable permits* (licenças comercializáveis, em tradução livre) de tráfego, e são exploradas de forma mais comedida na literatura da economia de transportes.

Se quando inicialmente consideradas, tais soluções tenham se apresentado como panaceias para as ineficiências dos sistemas de transporte – em especial as de cobrança pelo uso do viário urbano –, pesquisas deste século relatam limitações de aplicabilidade de tais medidas do ponto de vista tecnológico, operacional, social ou político e até críticas a respeito de seu sucesso como ferramenta para alcançar maior bem-estar social (e.g., PRUD’HOMME e BOCAREJO, 2005; GIVONI et al. 2011).

Alternativamente às estratégias de mercado (provenientes da teoria econômica), é possível endereçar tais externalidades através de estratégias operacionais no sistema de tráfego, por meio de medidas nas quais a variável de decisão não afeta o mercado diretamente, através do estabelecimento de impostos ou direitos de propriedade, mas através da distribuição da preferência de circulação e, indiretamente, de custos¹² de circulação de forma heterogênea e estruturada. Ainda que não seja praticável uma abordagem para atingir-se a otimalidade global (num sentido mais estrito) através destas medidas, tais intervenções podem dirigir o equilíbrio do sistema a níveis superiores de bem-estar social, apresentando-se, desta forma, como alternativas mais práticas para o tratamento das externalidades negativas dos sistemas de transportes.

É possível encontrar, tanto em literatura como em casos de cidades mundo afora, propostas de variadas medidas de gestão de tráfego com tal finalidade. Além de técnicas de otimização mais genéricas do controle de tráfego, as formas típicas destas medidas consistem na priorização de modos mais eficientes de transporte em detrimento dos menos eficientes. Usualmente, considera-se como modos mais eficientes aqueles que permitem o transporte de mais passageiros por unidade de espaço, de infraestrutura ou de energia consumida, bem como modos nos quais há economia (ou menor deseconomia) de escala com o crescimento da demanda – ambos critérios nos quais o transporte por ônibus usualmente se enquadra.

Exemplos destas soluções abrangem desde faixas dedicadas a veículos de passeio com mais passageiros (e.g., KONISHI e MUN, 2010; JAVID et al., 2017), mais comuns na América do Norte (conhecidas por *car-pooling lanes*, ou *high-occupancy vehicle - HOV lanes*), como faixas dedicadas a veículos de transporte coletivo (GUEVARA et al., 2011; BASSO et al., 2011) e até vias exclusivas para os mesmos (DENG e NELSON, 2011), mais comuns na América Latina, onde o transporte coletivo

¹² Aqui, refere-se a custos no sentido de “custos generalizados” pelo uso do sistema de transporte, que abrange não só custos financeiros, como custos operacionais, custos de capital e impostos, mas também custos econômicos (estes podendo ser mais ou menos tangíveis), como tempo, conforto, confiabilidade etc. Ao longo do texto, o termo “custo” será utilizado com esta conotação, ao passo que quando tratar-se do conceito de custo financeiro ou monetário o termo será devidamente especificado.

por ônibus é amplamente predominante. Ainda que possam enfrentar resistência política em alguns contextos, estas estratégias operacionais têm implementação facilitada (em contraste com medidas de pedágio urbano ou licenças comercializáveis), e, do ponto de vista social, não oneram em maior grau os menos dotados economicamente, como tendem a fazer as estratégias de mercado.

Dentre os elementos do contexto apresentado nesta seção, o presente estudo tem seu enfoque no emprego de medidas de Engenharia para a mitigação dos efeitos externos advindos das EVP em sistemas de transporte, apesar de também contemplar a avaliação de intervenções de mercado para tal fim. O tópico relativo a quais intervenções foram efetivamente avaliadas é retomado na seção 5.1, ao versar-se sobre o desenvolvimento dos cenários de intervenções a serem avaliados.

3. MÉTODOS PARA MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE PROJETOS DE TRANSPORTES

Paralelamente ao desenho de intervenções sobre sistemas de transportes como estratégias de mitigação de emissões de poluentes, deve-se analisar a capacidade das técnicas de estimação e avaliação de impacto de consistentemente capturar a potencial efetividade de medidas mitigatórias.

O emprego de modelos para planejamento de transportes tem se expandido rapidamente com a evolução da capacidade computacional e da crescente acessibilidade a tais recursos, o que tem possibilitado, ainda, a sofisticação destes modelos. A evolução dos modelos ao longo das décadas alinhou-se, além de aos problemas tipicamente em pauta, à capacidade de elaboração e operação destes modelos. O desenvolvimento e aplicação de modelos de transporte encontram como principais limitantes o arcabouço teórico para abordagem dos fenômenos associados ao transporte (e às atividades urbanas de modo geral), a capacidade computacional de processamento de informações e a qualidade e abrangência dos dados de entrada disponíveis.

O aumento de complexidade de tais modelos, proposta antes proibitiva devido principalmente a restrições de capacidade de processamento, permite contornar a necessidade de simplificações empregadas em modelos de uso profissional e, então, considerar (explicitamente) um número maior de variáveis, bem como detalhar seu processo de estimação e valoração. Com a difusão de computadores de alta performance e de softwares que fornecem opções de modelos sofisticados, como modelos estocásticos, microscópicos e dinâmicos, a gama de metodologias para a elaboração destes modelos apresenta-se consideravelmente ampla, fazendo com que a consolidação das abordagens mais adequadas para cada tipologia de problema (e subproblemas) torne-se um dos pontos críticos no desenvolvimento de modelos de transporte.

O presente capítulo busca detalhar os métodos de análise do impacto da operação do transporte urbano e das EVP (emissões veiculares de poluentes) associadas, com atenção particular à avaliação do impacto de intervenções sobre a operação de sistemas de transporte. A estrutura dos métodos e os modelos empregados são

explorados e discutidos à luz das discussões conceituais apresentadas no Capítulo 2, abrangendo-se individualmente os principais componentes destes métodos, elencados a seguir:

- Modelos de Simulação de Transportes;
- Modelos de Emissões Veiculares de Poluentes Atmosféricos
- Modelos de Estímulo-Resposta para Impactos de Poluentes Atmosféricos
- Métodos para Valoração de Impactos

Em adição a estes componentes, considera-se igualmente relevante, *a priori*, os métodos para projeção dos resultados do período de análise para o horizonte de análise. Este quinto componente é discutido nos exercícios analíticos por meio de uma abordagem exploratória, durante as discussões prévias e posteriores às aplicações práticas descritas no Capítulo 5.

3.1. Modelos de Simulação de Transportes

Modelos de transporte tem seu uso amplamente difundido como ferramenta para avaliação de impacto de projetos de infraestrutura, alterações de uso do solo, planos operacionais, políticas públicas, regulações e demais intervenções sobre o sistema de transporte e seu ambiente.

No sistema de transportes, diversos e variados agentes (i.e., tomadores de decisão) e elementos (e.g., veículos, vias, semáforos) interagem instante a instante, sendo o estado do sistema (e.g., fluxos de tráfego, velocidades médias) produto do equilíbrio entre estas ações e interações. Abordagens puramente analíticas para descrever estas interações e os estados resultantes do sistema são proibitivas dada a complexidade do sistema de transportes e ao fato de que os agentes se estimulam e interferem mutuamente no comportamento uns dos outros, através de interações diretas ou indiretas (estas, por meio de alterações nas condições de outros componentes do sistema).

Cabe aos chamados modelos de simulação de transportes, portanto, emular a interação entre os diversos agentes e elementos presentes a fim de permitir a estimação dos estados resultantes destas interações. Esclarece-se que o termo “simulação” é empregado uma vez que os modelos de transportes envolvem o emprego de modelos analíticos em combinação com métodos numéricos e processo iterativos, a fim de estabelecer equilíbrios entre os componentes do sistema e, a partir

destes, as condições esperadas para o sistema (e.g., fluxo por segmento viário, proporções de divisão modal, quantidades de emissões veiculares de poluentes) sob cada cenário (e.g., de variações na demanda, de alterações infraestruturais ou de controle de tráfego, de configurações regulatórias ou de políticas públicas).

Os modelos de transportes (como serão referidos daqui em diante) tratam de um conceito que abrange não só fenômenos contidos no sistema de transportes (e.g., congestionamentos), mas interações pertinentes ao ambiente no qual o sistema de transportes se insere, de modo geral. Dentre outras razões, isto se faz necessário pelo fato de a demanda por transportes ser uma demanda tida como “derivada”, no sentido de que pessoas e bens não almejam transportarem-se *per se*, mas transportam-se e são transportados pela necessidade de engajar-se em atividades ocorrendo num local distinto no espaço.

A Figura 3.1 apresenta uma caracterização genérica do sistema de transportes urbanos, seus subsistemas (no caso, os modos de transporte) e seu ambiente, o meio urbano no qual se insere. Fica evidenciado o fato de que a demanda por transportes deriva intrinsecamente das atividades urbanas, bem como que há diversos níveis de sistemas que interagem mutuamente e devem ser contemplados em processos de modelagem do sistema de transportes. Por estas razões, é usual que modelos de transporte contemplem representações desde do processo de desenvolvimento urbano até da estrutura decisória dos agentes – como a escolha de qual modo utilizar, a escolha do destino, a escolha da atividade e até a decisão de adquirir um automóvel ou não –, uma vez que são dimensões que interferem diretamente na forma como se dão os deslocamentos no sistema de transportes. A partir do mesmo diagrama, fica também evidenciada a necessidade de se contemplar em modelos de transportes não só variáveis que interfiram no estado do mesmo, mas também variáveis que influenciem o estado do ambiente no qual o mesmo se insere, como as emissões veiculares de poluentes – dito isto, destaca-se que o presente item da dissertação concentra-se na modelagem do sistema de transportes, sendo os efeitos externos ao sistema de transportes tratados nos itens subsequentes.

Figura 3.1: Caracterização genérica do sistema de transporte urbano

Fonte: Elaborado pelo autor

Um aspecto adicional a ser destacado é que a abrangência dos modelos de transporte não é definida *a priori*, mas sim baseada na aplicação almejada para o modelo, podendo diferir substancialmente em função do contexto e do problema em análise. Por exemplo, para modelos empregados em planejamento estratégico de sistemas de transportes, como o plano de expansão de uma malha metروviária, é importante contemplar a expansão da ocupação urbana, a evolução de características socioeconômicas (e.g., idade e renda), e comportamentos dos agentes em escalas de médio prazo (e.g., a decisão de possuir automóveis; a quantidade média de viagens geradas por habitante). Porventura, podem ser empregadas simplificações em aspectos inerentes ao sistema de transportes nestes contextos, como nas relações entre demanda e tempo de viagem em segmentos viários, sem prejuízo à empregabilidade do modelo, dado que estes fenômenos apresentam influência minoritária em cenários de médio a longo prazo.

Por outro lado, para modelos empregados em planejamento operacional, como o redesenho da malha de serviços de TCO (transporte coletivo por ônibus), ou sua modelagem econômico-financeira, passa a ser mais importante levar em conta aspectos operacionais dos sistemas de transportes e menos relevante compreender e estimar os fenômenos de médio prazo supracitados.

Além de isto motivar uma especificação dos modelos de transporte numa base caso-a-caso, as diferentes possíveis aplicações dos modelos de transportes culminam em uma gama de tipologias destes modelos disponíveis na literatura e dentre as empresas e consultores atuantes no setor. Aqui, destaca-se que esta seção se limita a tratar de representação da operação dos sistemas de transporte, não abrangendo técnicas para modelagem dos referidos efeitos de médio prazo, posto que o enfoque da pesquisa se dá em intervenções operacionais sobre sistemas de transportes rodoviários.

Para representação da operação de sistemas de transportes, primeiramente baseia-se na representação do sistema de oferta (e.g., vias, interseções, serviços de transporte público) e seu desempenho em função das condições do sistema – este doravante sendo referido por modelo de tráfego. Adicionalmente, é necessário estabelecer uma caracterização da demanda em termos de sua disposição espacial (e.g., pontos de origem e destino) e da representação do processo de tomada de decisão num horizonte de curto e curtíssimo prazo (e.g., escolhas de rota; mudanças de faixa, para motoristas de automóveis), em linha com o horizonte de análise de intervenções operacionais sobre o sistema de transportes. Numa visão taxonômica, é possível encontrar classificações que segregam os modelos entre: modelos macroscópicos, mesoscópicos ou microscópicos; modelos determinísticos ou estocásticos; modelos estáticos ou dinâmicos. Tais classificações são brevemente abordadas a seguir.

3.1.1. Grau de simplificação da representação de fenômenos em modelos de oferta

Como citado anteriormente, a escala das intervenções em análise são fatores preponderantes a serem considerados na especificação de modelos de oferta. Para análises na escala de corredores e eixos de transportes, usualmente presente em estudos para planejamento estratégico, é possível empregar um enfoque agregado na representação do sistema de tráfego e seus elementos (e.g., veículos, interseções), de forma que tais elementos não sejam representados explicitamente na estrutura dos modelos, mas de forma agregada (e.g., correntes de tráfego, eixos viários). É o caso dos modelos empregados usualmente no clássico Modelo Quatro

Etapas (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011), por exemplo, conhecidos por modelos macroscópicos (VAN WAGENINGEN-KESSELS et al., 2015).

Em contrapartida a tais modelos, há tipologias baseadas na necessidade de uma representação operacional mais acurada dos fenômenos que se dão no sistema de tráfego, baseadas mais rigorosamente em conhecimentos de engenharia de tráfego. Numa revisão sobre a genealogia dos modelos de tráfego – uma das bases fundamentais para construção de modelos de oferta –, Van Wageningen-Kessels et al. (2015) citam a existência de três tipologias em adição aos modelos macroscópicos: além dos já citados modelos mesoscópicos e microscópicos, é incluída a relação fundamental (ou diagrama fundamental) de Greenshields (1934, *apud* VAN WAGENINGEN-KESSELS et al., 2015), que é destacada como a precursora das demais tipologias de modelos de tráfego, por representar as fundações conceituais que inspiram o desenvolvimento destes modelos. Por esta razão, são aqui discutidas apenas os modelos macroscópicos, microscópicos e mesoscópicos, suas tipologias sucessoras.

A tipologia de modelos microscópicos baseia-se justamente no conceito oposto ao subjacente aos modelos macroscópicos: a representação individual dos elementos do sistema. Com efeito, objetiva-se que através desta representação seja possível representar características agregadas, como capacidades viárias efetivas e relações fluxo-velocidade, sendo tais métricas agregadas as efetivamente utilizadas como métricas na calibração e validação destes modelos e dos resultados produzidos pelo mesmo (FWHA, 2004). Em termos práticos, o elevado número de elementos sendo representados individualmente limita aplicações em grande escala desta tipologia de modelos por limitações de recursos computacionais.

Os modelos mesoscópicos, por sua vez, foram a última tipologia a surgir na literatura, segundo a revisão de Van Wageningen-Kessels et al. (2015), tendo sido propostos com o intuito de combinar o alto nível de detalhe na representação de aspectos operacionais do sistema, como a formação de gargalos e a propagação de filas (presente nos modelos microscópicos), com a aplicabilidade destes modelos em larga escala espaço-temporal (atributo de modelos macroscópicos).

Com a consolidação desta terceira tipologia, as fronteiras entre os conceitos tornaram-se tênues e por vezes imprecisamente definidas – ainda que, para efeitos práticos, isto acarrete poucos prejuízos além de problemas de comunicação. Ben-

Akiva et al. (2012) exploram o desenvolvimento de modelos mesoscópicos para aplicações em redes viárias urbanas congestionadas e discute sobre aspectos práticos da implementação de tais modelos. No referido estudo, são evidenciados requisitos para a abstração e representação do tráfego nesta tipologia de modelos, como: a agregação de veículos no máximo em correntes de tráfego por movimento direcional em cada segmento (em vez de agregá-los por segmento viário, como em modelos macroscópicos – e como intuitivamente se tende a propor inicialmente); a segregação dinâmica de segmentos viários conforme filas se formam e se dissipam, para cômputo do espaço disponível efetivamente para circulação e acúmulo de veículos; e um tratamento dinâmico de capacidade viária, em função da presença ou não de gargalos adiante.

A partir das descrições, é possível aferir que a tipologia mais indicada para representar o impacto de intervenções operacionais sobre os sistemas de TCO é a tipologia microscópica, em casos de intervenções em escala local. Em linha com o discutido, em casos de intervenções mais generalizadas, nos quais a capacidade computacional possa tornar-se uma restrição, é recomendável empregar modelos com menor grau de precisão na representação do tráfego, como especificações de modelos mesoscópicos que logrem representar a heterogeneidade da frota e do uso das faixas de tráfego juntamente de interferências operacionais localizadas (e.g., como estreitamentos no tráfego misto devido à presença de faixas de ultrapassagem).

Antes da sequência, cabe um único destaque acerca da calibração destes modelos: ainda que a especificação de modelo adotada possa considerar diferentes escalas de agregação (i.e., macroscópica a microscópica), é recomendado que se considere parâmetros macroscópicos do sistema como métricas de calibração e validação dos modelos (e.g., capacidades viárias, tempos de viagem, fluxos, densidades) – não necessariamente de forma exclusiva, mas preferencialmente de forma prioritária.

No caso de modelos desagregados, como os microscópicos, a medição direta dos parâmetros utilizados para calibração (e.g., tempo de reação, aceitação de distâncias e brechas) se daria de forma demasiadamente complicada, seja pelo fato de a maioria destes representarem aspectos sutis de difícil isolamento em experimentos, seja pelos demais requererem uma extensiva – e, portanto, tipicamente antieconômica – coleta

de dados (HOLLANDER e LIU, 2008). As relações macroscópicas, por outro lado, são mais facilmente observáveis e mais frequentemente monitoradas, além de serem objeto de pesquisa de forma ampla na literatura da teoria de fluxo de tráfego, de gestão e controle de tráfego e áreas correlatas, possuindo maior validade científica e, mais importante, oferecendo maior clareza a respeito de como os parâmetros se relacionam entre si e influenciam nos estados e no desempenho do sistema de transportes.

3.1.2. Abordagem a dimensões não-físicas

Em adição à representação de aspectos físicos, duas dimensões do problema são tratadas com mais profundidade na literatura da modelagem de transportes: a dimensão temporal e a representação das incertezas.

3.1.2.1. Representação da dimensão temporal

Posto que a modelagem de tráfego tenha se iniciado pelos modelos macroscópicos, a dimensão temporal não era inicialmente tratada de forma explícita nos modelos. Explica-se: a abstração subjacente a estes modelos é a de que todos os eventos ocorrem ao mesmo tempo ao longo da rede de transportes, sendo avaliadas condições médias ao longo do período de análise. Por esta premissa implícita, tais modelos são classificados como modelos estáticos.

A referida assunção de modelos estáticos representa uma simplificação da realidade que provoca perdas de precisão razoavelmente intuitivas. Particularmente importante é a perda de sensibilidade ao caráter dinâmico da formação e propagação de gargalos na rede viária, fator preponderantemente influente na determinação de capacidades viárias efetivas e tempos de viagem em redes densas, como em áreas urbanas. Todavia, como mencionado anteriormente, para análises com enfoque estratégico, a representação de tais fenômenos são tão negligenciáveis quanto a de outros aspectos operacionais do sistema.

No que diz respeito a análises com enfoque mais local e/ou de mais curto prazo, passa a ser de maior relevância representar a dimensão temporal em detalhe, ao menos em relação a alguns dos componentes do sistema de transportes. Em modelos microscópicos, a dimensão temporal é naturalmente representada no modelo de tráfego, posto que cada veículo é considerado e representado de forma individual a

cada instante. Isto faz com que fenômenos associados às interações entre veículos ou dos veículos com o sistema viário, como capacidades viárias efetivas e propagação de filas, tenham seu caráter dinâmico capturado pelo modelo.

A representação da dimensão temporal na demanda por viagens, como detalhamento de horários de partida, se dá de forma dissociada da representação da dimensão temporal no sistema de tráfego, e pode ser negligenciada ou introduzida conforme necessário. Em cenários nos quais a decisão sobre o horário de partida ou chegada das viagens seja um dos parâmetros endógenos às análises, ou em que o comportamento médio da demanda omita picos instantâneos relevantes para a compreensão do desempenho do sistema, por exemplo, convém contemplar o caráter temporal da demanda por viagens na modelagem do sistema para evitar grandes perdas de precisão e consistência.

Modelos que incluam a dimensão temporal de componentes do sistema são denominados modelos dinâmicos e têm sido crescentemente explorados na literatura recente (e.g., TRB, 2011; BEN-AKIVA et al. 2012). Como norma geral, o emprego de tais modelos, em detrimento de modelos estáticos, vem com a necessidade de sofisticação do modelo para detalhamento das interações (e seus efeitos) a serem representadas. Deve-se ter em mente, todavia, o requerimento de maior capacidade computacional e de dados de entrada mais detalhados para implementação dos modelos dinâmicos, em comparação aos estáticos, o que pode justificar a inclusão apenas parcial da dimensão temporal nos modelos.

3.1.2.2. Representação de incertezas

De modo geral, a representação de interações entre componentes do sistema e aspectos comportamentais dos agentes nos modelos de transportes se dá através de submodelos analíticos (e.g., modelos de escolha discreta; funções de custo generalizado). Estes são usualmente estabelecidos a partir de formas funcionais pré-estabelecidas e parâmetros calibráveis, que são definidos a partir de valores típicos fornecidos pela literatura ou técnicas de inferência estatística, como métodos econométricos. Há duas principais fontes de incerteza associadas a estes submodelos:

- Emprega-se como parâmetros valores médios, estimados ou fornecidos pela literatura, enquanto o que usualmente se observa é uma dispersão destes

parâmetros (e.g., valor subjetivo do tempo; tempo de reação; taxa máxima de frenagem) na população;

- As variáveis consideradas explicitamente nos submodelos podem representar apenas um subconjunto das variáveis relevantes a dado fenômeno, o que implica haver componentes não explicitamente contempladas pelos submodelos que, ainda assim, têm influência sobre o fenômeno em análise.

Para ambos os casos, a alternativa tradicional para considerar-se a presença de incerteza é permitir que os parâmetros dos submodelos (i.e., tanto as variáveis quanto os termos de erro) variem aleatoriamente em torno dos valores médios. No caso particular da segunda fonte de incerteza citada, o tratamento à incerteza se dá ao considerar a existência de uma componente aleatória não-observada (de média zero) que se soma à componente explicitamente avaliada pelo submodelo, como usualmente implementado na valoração da variável latente (utilidade) em modelos de escolha discreta.

Modelos que permitam variações aleatórias dos parâmetros são referidos por modelos estocásticos – ou, no caso contrário, determinísticos. Destaca-se que modelos podem ser estocásticos em relação a apenas alguns componentes e fenômenos do sistema, bem como que, quanto mais efeitos estocásticos são introduzidos, maior a capacidade de processamento computacional requerida para implementação do modelo.

3.2. Modelos de Emissões Veiculares de Poluentes Atmosféricos

Variados fatores influem na composição e volume das emissões veiculares de poluentes (EVP). Castro (2008) enumera, como os principais:

- **Tipo de motor:** são diferentes as quantidades e proporções de poluentes emitidos por veículos do ciclo Otto (ignição à faísca) ou do ciclo Diesel (combustão espontânea) ou ainda dos novos motores híbridos – que associam o motor a combustão a um motor elétrico – ou totalmente movidos a fontes de energia alternativas;
- **Tipo de combustível:** o uso de diferentes combustíveis, como gasolina, álcool, diesel, gás natural veicular (GNV), gás natural liquefeito (GNL) ou biodiesel gera diferentes composições de emissões. Além disso, um determinado combustível pode ter diferentes constituições. É o caso da gasolina brasileira, que pode conter diferentes porcentagens de álcool misturado, e do diesel, em função dos teores de enxofre presentes;

- **Estado de conservação e Idade do veículo:** à medida que os componentes do motor e os sistemas de filtros e catalisadores se desgastam aumentam os níveis de emissões;
- **Características das vias:** vias que propiciam melhores condições de tráfego no que diz respeito a características tais como condições de pavimento, alinhamento geométrico e declividades, contribuem para a diminuição das emissões por km;
- **Características climáticas:** as condições ideais de combustão variam em função das condições de altitude, umidade relativa do ar e temperatura, gerando diferentes consumos de combustíveis e composições de emissões – mantidos constantes os demais fatores.
- **Operação do veículo:** diversos experimentos e medidas de campo têm mostrado que as emissões veiculares ocorrem em maior quantidade nas fases de aceleração e desaceleração. Assim, estilos de condução mais ou menos agressivos e especialmente a incidência de congestionamentos têm influência direta no total de poluentes emitidos.

De forma mais geral, estas emissões veiculares (E_t) podem ser definidas através da soma de quatro componentes (OSSES, 2006):

$$E_t = E_q + E_f + E_{ev} + E_p \quad (3.1)$$

na qual:

E_t : emissões totais de um poluente, dada como uma função de espaço e tempo;

E_q : emissões a quente, provenientes da combustão após a fase de estabilização térmica do funcionamento do motor;

E_f : emissões a frio, provenientes da combustão, no período entre a partida do motor e o atingimento da temperatura ótima de operação;

E_{ev} : emissões geradas pela evaporação do combustível (cárter, carburador e tanque);

E_p : emissões de partículas provenientes do desgaste de pneus e freios e ressuspensão de poeira.

Nota-se que, dentre as parcelas provenientes da combustão, é feita a distinção entre emissões a frio e emissões a quente. Isto se faz necessário uma vez que, até que se atinja a temperatura ótima de operação do motor, há maior ocorrência de combustão incompleta, impondo taxas mais elevadas de emissões de CO, HC e PM até que a operação se estabilize (CASTRO, 2008).

Dentre as quatro componentes listadas acima, ainda que as emissões a frio ocorram a uma taxa superior, tem-se que a parcela mais representativa são as emissões a quente. Evidências sobre a RMSP apontam que emissões a quente representem entre 80% e 95% das emissões por combustão (LENTS et al., 2004).

Intervenções sobre sistemas de transportes de diversas naturezas (e.g., regulatórias, tecnológicas, de gestão de tráfego) no âmbito da mitigação de emissões de poluentes atmosféricos têm sido extensivamente exploradas na literatura científica recente. Em adição à exploração de intervenções com esta finalidade específica, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas suficientemente capazes de estimar as quantidades de poluentes emitidas sob diferentes cenários. Particularmente no contexto de sistemas de transportes, tais técnicas devem apresentar-se compatíveis com técnicas comumente empregadas na avaliação de projetos na área, isto é, aos modelos de transportes e de tráfego abordados na seção anterior.

Novamente, estão disponíveis na literatura metodologias variadas para a quantificação de emissões veiculares de poluentes a partir de parâmetros operacionais de um dado sistema de transportes (e.g., fluxos veiculares, distâncias percorridas, velocidades). É possível encontrar críticas a respeito da acurácia de tais modelos, principalmente no tangente à alta variabilidade de níveis de emissões observados em condições similares de operação (e.g., perfis de velocidade e aceleração) e características veiculares (e.g., combustível, idade da frota) (O'DISCROLL et al., 2016), bem como relativas a divergências entre emissões em testes laboratoriais vis-à-vis a condições do mundo real (O'DISCROLL et al. 2016; TIETGE, et al., 2017). De todo modo, ainda que boa parte dos modelos calibrados com base em dados obtidos em laboratório, tais críticas não invalidam a presença de correlação entre emissões veiculares de poluentes e parâmetros operacionais do tráfego.

É possível encontrar na literatura esboços de uma taxonomia sobre modelos de EVP no âmbito dos sistemas de transportes. Osorio e Nanduri (2015) dividem modelos de EVP em duas categorias: macroscópicos e microscópicos, similarmente à classificação de modelos de tráfego. A distinção, segundo as autoras, é que modelos microscópicos se baseiam em perfis de velocidade e aceleração de veículos, segundo a segundo, ao passo que modelos macroscópicos são usualmente calibrados com

base em ciclos de condução em laboratório e aplicados com base em velocidades médias e fatores de ajuste.

Na revisão bibliográfica desenvolvida por Park et al. (2016), é considerada uma classificação similar, porém a partir de terminologias que aludem à aplicabilidade de cada tipologia: os modelos são discriminados entre modelos para inventários de emissões e modelos de emissões instantâneas. A classificação é compatível com a utilizada por Osorio e Nanduri (2015), sendo a classe de modelos para inventários análoga à de modelos macroscópicos, e a classe de modelos de emissões instantâneas, à de modelos microscópicos (salvo raras exceções).

Smit (2013), por sua vez, propõe que os modelos sejam subdivididos em três grupos, apresentados a seguir. A fim de ilustrar as descrições, são citados ainda exemplos de modelos que se enquadram em cada classe, sendo estes modelos apresentados em mais detalhes na sequência desta seção. A taxonomia abaixo descrita é compatível com as definições de modelos macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos aludida e empregada na revisão de Park et al. (2016), nesta ordem.

- **Average-speed models:** Modelos baseados em velocidades médias, em tradução livre, nos quais esta é a variável utilizada para estabelecimento das taxas médias de emissões (em gramas/veículo*quilômetro). Exemplos são o COPERT e o MOBILE;
- **Traffic-situation models:** Modelos baseados na condição de tráfego, em tradução livre, nos quais taxas médias de emissões são função de condições de tráfego pré-estabelecidas e catalogadas (e.g., tráfego ininterrupto; tráfego livre em via semaforizada, ou tráfego descontínuo). É o caso dos modelos baseados em ciclos de condução, como o modelo IVE (*International Vehicle Emission*), explorado em detalhes em Lents et al. (2004) e Castro (2008). Exemplo adicional é o modelo HBEFA;
- **Modal models:** Modelos modais instantâneos, em tradução livre, nos quais fatores de emissão (gramas/segundo) são determinados por condições instantâneas de operação dos motores ou veículos. São exemplos os modelos CMEM e PHEM.

Uma segunda distinção feita por Park et al. (2016) diz respeito ao conceito subjacente à calibração dos modelos, dividindo-os em modelos baseados na demanda energética (*power demand-based models*, ou *load-based models*, como referidos em CAPIELLO, 2002) e modelos baseados em técnicas de regressão agregada (*regression models*) – estes, baseados apenas na aplicação de métodos

numéricos sobre bancos de dados contendo as variáveis operacionais do tráfego (e.g., velocidades instantâneas; acelerações instantâneas), como explicativas, e as variáveis dependentes em questão (e.g., emissões de CO₂; emissões de NO_x), sem levar em conta explicitamente os fenômenos físico-químicos responsáveis pela geração de EVP.

Historicamente, é atribuída ao CARB – California Air Resources Board o pioneirismo no desenvolvimento de modelos de EVP, no final da década de 1960, motivado pelos severos problemas de saúde causados pela poluição atmosférica no estado – culminando na primeira versão do EMFAC para inventário de EVP (PARK et al., 2016). Desde então, os modelos para inventário foram atualizados e recalibrados para refletir mudanças regulatórias e tecnológicas no controle de emissões. Todavia, destacam Park et al. (2016), modelos para inventários são aplicáveis apenas em escalas espaciais relativamente grandes, não abrangendo a necessidade de capturar efeitos mais detalhados e desagregados de padrões de navegação sobre emissões e consumo de combustíveis, como (citam os autores) a avaliação de impacto da implementação de rotatórias, otimizações semaforicas ou medidas de controle de acesso (*ramp metering*, em tradução livre). Nota-se que os autores não fazem menção a medidas de priorização de tráfego a veículos de TCO – entende-se que devido a este conjunto de medidas ser mais presente em grandes cidades de países em desenvolvimento, como São Paulo.

Park et al. (2016) listam os modelos empregados em cada contexto de análise conforme exibido na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2. Para informações mais detalhadas sobre os modelos, os leitores são remetidos ao trabalho original, bem como aos estudos e relatórios de divulgação da calibração de cada modelo especificamente (e.g., SMIT, 2013, para o P Δ P; RAHKA et al., 2004, para o VT-Micro; AKÇELIK et al., 2014, para o SIDRA INTERSECTION).

Tabela 3.1: Modelos para Inventário de Emissões Veiculares de Poluentes

Modelo	Desenvolvido/Publicado por	Poluentes Primários Contemplados
MOBILE	<i>Environmental Protection Agency</i> – EUA	HC, CO, NO _x , CO ₂ , PM, NH ₃ , SO ₄ , SO ₂ , chumbo, desgaste de freios e pneus, formaldeído, acetaldeído
MOVES	<i>Environmental Protection Agency</i> – EUA	HC, CO, NO _x , CO ₂ , PM, N ₂ O, desgaste de freios e pneus, sulfatos e, além de poluentes, consumo de energia

Modelo	Desenvolvido/Publicado por	Poluentes Primários Contemplados
EMFAC	<i>California Air Resources Board</i> – EUA	HC, CO, NOx, PM, SOx, CO2, desgaste de freios e pneus e, além de poluentes, FC (consumo de combustíveis)
IVE*	<i>International Sustainable Systems Research Center</i> – EUA	HC, CO, NOx, PM, CO2
COPERT	<i>European Environment Agency</i> – Europa	HC, CO, NOx, CO2, PM, NH3, SO2, N2O e, além de poluentes, FC
DMRB	<i>Highways Agency</i> – Reino Unido	HC, CO, NOx, PM e, além de poluentes, FC
HBEFA	<i>Environmental Protection Agency</i> – Alemanha, Suíça e Áustria	HC, CO, NOx, CO2, PM, SOx, N2O, NH3 e, além de poluentes, FC
VERSIT+	TNO – Holanda	HC, CO, NOx, CO2, PM e, além de poluentes, FC

Fonte: Traduzido de Park et al. (2016); *conteúdo introduzido com base em CASTRO (2008)

Tabela 3.2: Modelos de Emissões Veiculares Instantâneas de Poluentes

Modelo	Desenvolvido/Publicado por	Poluentes Primários
CMEM	<i>University of California, Riverside</i> – EUA	CO, CO2, HC, NOx, PM e, além de poluentes, FC
EMIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> – EUA	CO, CO2, HC, NOx, PM e, além de poluentes, FC
VT-Micro	<i>Virginia Tech</i> – EUA	CO, CO2, HC, NOx, PM e, além de poluentes, FC
PHEM	<i>Technical University of Graz</i> – Áustria	CO, CO2, HC, NOx, PM e, além de poluentes, FC
VeTESS	MIRA – Reino Unido	CO, CO2, HC, NOx, PM e, além de poluentes, FC
EMPA	EMPA – Suíça	CO, CO2, HC, NOx e, além de poluentes, FC
SIDRA INTERSECTION*	Akçelik (2014) – Austrália	CO, CO2, HC, NOx e, além de poluentes, FC
PAP	R. Smit (2013) – Austrália	CO2, NOx e, além de poluentes, FC

Fonte: Traduzido de Park et al. (2016); *conteúdo introduzido com base em Akçelik et al. (2014)

Nota-se que Park et al. (2016) omitem modelos de regressão para estimativa de emissões instantâneas, como os estimados por Panis et al. (2006) e Bigazzi e Figliozzi (2012). Postula-se que isto se deva a um enfoque daqueles autores a modelos baseados em demanda energética, dentre os modelos de emissões instantâneas – exceção feita ao modelo VT-Micro (RAKHA et al., 2004). Entende-se, ainda, que isto se deva a dificuldades na transferibilidade de modelos de regressão agregada, uma vez que, como as regressões são feitas diretamente sobre valores de velocidades e acelerações instantâneas, as características da frota presentes nos dados utilizados para estimação dos modelos ficam implicitamente embutidas nas relações obtidas.

Destaca-se que o fato de haver uma tipologia de modelos mais detalhada não torna obsoletos os modelos mais agregados. De modo geral, observa-se que modelos de inventários abrangem um número maior de poluentes, o que se entende ser possível devido à natureza mais agregada das estimativas. Ainda, observa-se que por tratarem de emissões instantâneas, modelos modais usualmente tem seu enfoque em emissões a quente, ao passo que modelos para inventário (e.g., CETESB, 2018a) tipicamente não negligenciam demais componentes das emissões totais (e.g., emissões a frio e por evaporação).

A depender da finalidade da aplicação, modelos agregados podem oferecer estimativas que atendam às necessidades sem demandar dados de entrada detalhados, como perfis de velocidade e aceleração instantânea por veículo. Adicionalmente, é possível combinar modelos agregados e desagregados em aplicações específicas, como no estudo desenvolvido por Nanduri (2013), em que modelos macroscópicos de EVP são utilizados em cálculos iterativos através de expressões analíticas tratáveis, a fim de permitir uma primeira aproximação com menor esforço computacional dentro de métodos numéricos de otimização, sendo modelos microscópicos de EVP utilizados para estimativas de emissões mais precisas, *a posteriori*.

Para avaliações de impacto de intervenções operacionais sobre o sistema de tráfego, em particular às em escala local, todavia, se faz necessário o emprego de modelos da devida sensibilidade aos impactos centrais destas intervenções (i.e., mudanças nas condições de tráfego locais). A escolha efetiva do modelo a ser empregado deve ser tomada com base na aderência dos dados utilizados para calibração com o contexto de aplicação (e.g., características da frota, tecnologia dos motores, condições climáticas e condições de tráfego), da disponibilidade dos dados de entrada necessários (e.g., perfis de velocidade e aceleração) e ao grau de compatibilidade dos modelos de EVP às ferramentas utilizadas para modelagem e análise do sistema de transportes. A tipologia de modelos efetivamente utilizada é apresentada na seção 4.4.1 e descrita em maior detalhe na seção Apêndice: F).

3.3. Modelos de Estímulo-Resposta para Impactos de Poluentes Atmosféricos

Além de estimar a quantidade de poluentes emitida pelo sistema de transportes, é necessário estabelecer a relação entre tais quantidades e seu impacto sobre o ambiente no qual o sistema se insere. Em linha com as técnicas previamente abordadas para análise do desempenho do sistema de transportes e para quantificação das emissões associadas à operação dos mesmos, esta seção abrange métodos que relacionem o estímulo sobre o ambiente (i.e., os poluentes emitidos) e a resposta esperada (i.e., os impactos das emissões): os denominados modelos de estímulo-resposta.

É possível identificar autores que classificam o impacto das emissões sobre os viajantes, individualmente, como parte dos custos privados de viagem (BIGAZZI e FIGLIOZZI, 2012; CUI e LEVINSON, 2020). Esta abordagem é naturalmente consistente e poderia, portanto, influenciar o processo decisório dos viajantes. Todavia, os próprios autores estabelecem argumentos em desfavor desta abordagem, no âmbito das respectivas pesquisas, seja por considerar tais custos como de difícil compreensão e percepção (BIGAZZI e FIGLIOZZI, 2012), seja por considerá-los de magnitude desprezível face aos demais custos privados de viagem (CUI e LEVINSON, 2020). Por tais razões, os custos decorrentes das EVP são tratados exclusivamente como externalidades na presente pesquisa.

Conforme destacado na seção 2.3, as externalidades associadas às emissões de poluentes podem ser subdivididas em duas classes, conforme sua escala de impacto: os efeitos globais (associados a mudanças climáticas) e os efeitos locais (associados à qualidade do ar localmente e seus impactos sobre a saúde humana). Nesta seção, ambas escalas de efeitos também são tratadas de forma específica.

3.3.1. Efeitos em escala global

Os impactos globais provenientes da emissão de poluentes atmosféricos são relacionados a um número reduzido de fatores, em comparação aos impactos locais, dada a escala do impacto em análise. A principal métrica de impacto utilizada é denominada *Radiative Forcing*, ou RF (IPCC, 2014), que traduz a quantidade de radiação adicional retida na Terra, em vez de dissipada, devido à presença de

poluentes em suspensão na atmosfera (medido em W/m^2). Tal grandeza é utilizada pois atribui-se a existência de correlação entre a quantidade de radiação retida pela atmosfera e as EVP, permitindo relacionar a quantidade de poluentes emitidos com o grau de aquecimento global esperado e, por conseguinte, os danos e custos sociais associados.

Conforme descrito, tais métricas são relativas à radiação adicional retida, em vez de diretamente associada a poluentes específicos. A partir desta métrica, é possível estabelecer, por exemplo, o custo esperado associado aos impactos da emissão de uma tonelada de dióxido de carbono (usualmente tomado como o poluente-referência) e a partir disso estimar o custo associado a quantidades emitidas de outros poluentes – bastando que se estabeleça uma métrica de equivalência entre os impactos unitários de cada poluente.

A fim de estabelecer tal escala de equivalência entre emissões dos diversos poluentes, é proposto o indicador *Global Warming Potential*, ou GWP (IPCC, 2014). Tal métrica avalia o grau de RF imposto pela presença de uma tonelada de dado poluente na atmosfera em comparação ao impacto da presença de uma tonelada de dióxido de carbono – que, por definição, tem GWP unitário, e faz com que o GWP seja por vezes referido e interpretado como o coeficiente de equivalência em CO₂, ou de carbono-equivalente (IPCC, 2013). A publicação também cita algumas variantes do GWP, como o GTP (potencial de mudança da temperatura global, em tradução livre) e valores de GWP com diferentes taxas de desconto anuais. Todavia, tais métricas alternativas não possuem grande divergência em relação ao GWP, não sendo, portanto, abrangidas pela presente pesquisa.

No que diz respeito ao cômputo do RF e, logo, do GWP, deve-se levar em conta ainda que os poluentes, uma vez liberados à atmosfera, passarão por processos físico-químicos e originarão diferentes substâncias em diferentes quantidades ao longo do tempo. É necessário, portanto, compreender e comparar impactos abrangendo a dimensão também temporal do problema, contemplando a persistência média do efeito de RF de dado poluente (e poluentes secundários originados a partir do mesmo) ao longo dos anos. Tendo isto em vista, a fórmula para cálculo do GWP pode ser formalizada como segue:

$$GWP_i = \frac{AGWP_i}{AGWP_{CO_2}} = \frac{\int_0^T RF_i(t) * dt}{\int_0^T RF_{CO_2}(t) * dt} \quad (3.2)$$

na qual:

$AGWP_i$: GWP absoluto do poluente i;

GWP_i : GWP equivalente do poluente i, em relação ao dióxido de carbono;

$RF_i(t)$: RF atribuído ao poluente i, em função do tempo t após sua emissão;

T : horizonte temporal em análise

A Figura 3.2 ilustra o significado do GWP e a influência do horizonte de análise: são apresentados os AGWP para o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂ – poluente referência). Conforme ilustrado, o efeito do metano em termos de RF é intenso, porém pouco persistente no tempo, e a natureza integrativa do cálculo do AGWP faz com que sua curva para o CH₄ (curva amarela) se estabilize após aproximadamente 5 décadas (IPCC, 2013). A curva azul, que representa o AGWP para o dióxido de carbono, indica que o efeito do CO₂ na atmosfera é mais perene, por sua vez. O contraste entre ambos implica que o GWP do metano decresça conforme é estendido o horizonte temporal de análise.

Figura 3.2: Relação entre AGWP e GWP para o CH₄

Fonte: Reproduzido de IPCC (2013)

A partir de relatórios do IPCC (2013), uma das principais referências na compreensão de mudanças climáticas provocadas pela ação antropológica, é possível identificar ainda que são poucos os fatores que interferem na valoração do impacto dos poluentes emitidos em termos de RF. Os relatórios distinguem o impacto de poluentes emitidos (i.e., o GWP atribuído) segundo a região geográfica (e.g., hemisfério, continente ou regiões pouco mais desagregadas) onde o mesmo fora emitido, em alguns casos, além de em função do horizonte temporal considerado – esta última representando mais uma premissa técnica que uma característica intrínseca do sistema.

Desta forma, a relação estímulo-resposta é dada diretamente em função da quantidade de poluentes emitida, a partir dos coeficientes de equivalência entre poluentes (i.e., GWP) e o custo social atribuído ao RF, ou, como referência, ao AGWP de uma tonelada de CO₂.

Uma decorrência direta desta característica da relação estímulo-resposta é que um cenário no qual o efeito líquido sobre as emissões é negativo (i.e., a quantidade de poluentes emitida é inferior à linha base) será benéfico do ponto de vista dos efeitos globais, não sendo necessário levar em conta a distribuição (e.g., espacial, horária) da quantidade de poluentes emitida em cada cenário. Isto permite que sejam

aplicadas técnicas de estimativa de emissão de poluentes mais agregadas sem prejuízo adicional à conclusão, além do próprio erro devido à maior agregação da abordagem.

Por fim, a Tabela 3.3 reproduz os valores de GWP (IPCC, 2013) atribuídos aos principais poluentes atmosféricos do ponto de vista dos efeitos globais, conforme elencado ao final do item 2.3.1.

Tabela 3.3: Custos estimados associados ao impacto climático da emissão de 1 tonelada de dióxido de carbono

Poluente	GWP20 (GWP no horizonte de 20 anos)	GWP100 (GWP no horizonte de 100 anos)
CO ₂	1	1
CH ₄	84	28
N ₂ O	264	265

Fonte: IPCC (2013), p. 731

3.3.2. Efeitos em escala local

Além de fortemente dependentes do local onde os poluentes são emitidos, para avaliação dos efeitos locais das emissões de poluentes atmosféricos é necessário analisar fenômenos complementares que se dão após a emissão de um dado poluente e que também afetam de sobremaneira o impacto efetivo destas emissões.

A complexidade do processo é destacada no estudo de Kickhöfer e Kern (2015), que sumariza o problema dos efeitos locais das emissões de poluentes atmosféricos com base em suas ditas 5 dimensões – que servem os resultados de uma como dados de entrada da seguinte –, nomeadamente:

- i. Modelagem de emissões instantâneas de poluentes (referidas por *exhaust emissions*, *tailpipe emissions*, ou emissões pelo escapamento, em tradução literal);
- ii. Modelagem da dispersão e reação dos poluentes;
- iii. Derivação de concentrações de poluentes;
- iv. Estimação da exposição da população aos poluentes – com eventual enfoque a grupos especialmente sensíveis da população, como grávidas, idosos e crianças; e
- v. Funções de dose-resposta, em termos de admissões em hospitais, perdas de anos de vida, mortes etc.

Da segmentação proposta para o problema, nota-se que a relação estímulo-resposta proposta se dá não a partir das emissões diretamente, mas a partir da

concentração de poluentes resultante das emissões e da exposição da população às concentrações resultantes. Os autores do estudo destacam, todavia, que uma metodologia que abranja de forma holística e detalhada todas as dimensões do problema potencialmente enfrentaria restrições de disponibilidade tanto dos dados de entrada requeridos quanto da capacidade computacional necessária para processamento das informações.

No âmbito da avaliação de intervenções operacionais, o que se observa efetivamente é o emprego de aproximações, agregações ou premissas para sobrepor-se à complexidade original do problema como um todo, buscando obter modelos que traduzam os fenômenos relevantes em expressões de estímulo-resposta tratáveis, compreensíveis e, acima de tudo, sensíveis às principais características do ambiente e às variáveis de decisão do problema. Para abordagens que visem estabelecer com mais precisão as condições finais esperadas, os leitores são remetidos a estudos que acoplem modelos atmosféricos (i.e., de dispersão, reação e concentrações finais) a modelos de transportes, como praticado por Hatzopoulou e Miller (2010) na modelagem da Região Metropolitana de Toronto, Canadá – para o caso da RMSP, os leitores são remetidos à discussão desenvolvida por Andrade et al. (2017).

Isto posto, é examinada, a seguir, a abordagem empregada no tratamento das dimensões (ii) a (v) em estudos da área de transportes (complementados por trabalhos de outras áreas, quando necessário) que contemplam temáticas similares à da presente pesquisa, buscando estabelecer metodologias de referência para o desenvolvimento do modelo analítico descrito no Capítulo 4.

3.3.2.1. Dispersão e concentrações resultantes

Em Kickhöfer & Kern (2015), o autor e a autora buscam avaliar o impacto de diferentes premissas para a precificação de externalidades, em tratamentos similares às estratégias de mercado discutidas no item 2.3.3. São avaliadas cobranças baseadas em EVP e, alternativamente, cobranças baseadas na exposição a poluentes. As conclusões obtidas pelos autores são discutidas na seção 4.1.1, adiante, ao passo que aqui se explorará a metodologia empregada para relacionar emissões e seus efeitos finais.

A simplificação empregada é proposta com base em Stern et al. (1984, apud Kickhöfer & Kern, 2015), que apresentam em seu livro dois modelos básicos de dispersões: o modelo em pluma (*plume model*, em tradução livre), para fontes pontuais; e o modelo em caixa (*box model*, em tradução livre), para fontes múltiplas e análises abrangendo áreas. Para fins práticos, desconsidera-se a dimensão vertical do espaço, sendo o fenômeno de dispersões tratado no plano horizontal. Ainda, é negligenciada a influência de condições meteorológicas (e.g., velocidade e direção dos ventos) sobre os padrões de dispersão.

O centro da metodologia efetivamente aplicada por Kickhöfer & Kern (2015) baseia-se na discretização do espaço em células (quadradas, de lado igual a 250m) e reside na modelagem das dispersões dos poluentes emitidos através de uma curva gaussiana, calculada como na equação a seguir:

$$DF_{i,k} = \exp\left(-\frac{x_k^2}{2l^2}\right) \quad (3.3)$$

na qual,

$DF_{i,k}$: fator de dispersão do poluente i na célula k (adimensional);

x_k : distância do centro da célula k ao centro da célula emissora (em metros)

l : dimensão da célula (em metros), igual a 250 metros no referido estudo;

Em adição às simplificações supracitadas, os autores destacam que o uso de uma mesma curva para todos os poluentes é questionável, conforme indicado no estudo de Karner et al. (2010). Neste, observa-se uma grande discrepância no comportamento das concentrações de PM quando contrastadas às demais: em sua maioria, a concentração de poluentes em geral atingiu, a uma distância da ordem de 150 metros do eixo da via onde se dá a emissão, 50% do valor observado à margem das vias (*edge-of-road concentrations*, em tradução livre) – tomado como referência no referido estudo –, ao passo que no caso das concentrações de PM, observou-se valores em torno de 60% do valor referência a uma distância de 400 metros do eixo da via.

Postula-se que, a partir da equação (3.3), substituindo-se o numeral “2” no denominador do expoente por um coeficiente de calibração γ , estabelecido

individualmente para cada poluente, seja possível obter uma formulação genérica passível de ser adequada para diferentes padrões de decaimento de concentrações observados. Tal formulação genérica é apresentada na equação (3.4):

$$DF_{i,k} = \exp \left(- \frac{x_k^2}{\gamma_i * l^2} \right) \quad (3.4)$$

na qual,

γ_i : coeficiente de decaimento das concentrações associado ao poluente i – a título de exemplo: o parâmetro assumiria o valor de 5,0 para o PM, se a fim de representar 60% da concentração a 400m da margem das vias, e 0,52, para representar casos genéricos, com base nas evidências apresentadas em KARNER et al. (2010));

Postula-se adicionalmente, entretanto, que previamente à calibração de curvas genéricas de dispersão deve-se observar que os perfis e os gradientes de decaimento das concentrações associados potencialmente são dependentes, em algum nível, da relação entre a magnitude das concentrações de fundo (*background concentrations*, em tradução livre) e das contribuições individuais do tráfego. No mesmo estudo de Karner et al. (2010), os autores observam que os picos relativos de concentrações de PM junto à margem das vias (i.e., relativos às concentrações de fundo estimadas) apresentam-se como os menores picos relativos dentre os poluentes avaliados (juntamente dos VOC, a título de registro), em comparação às concentrações afastadas do eixo das vias – o que pode justificar, ao menos parcialmente, o menor decaimento relativo do PM observado à medida que o ponto de medição se afasta do eixo da via.

De todo modo, destaca-se que no estudo de Kickhöfer e Kern (2015) a formulação empregada para modelagem da dispersão de emissões não busca correlacionar as EVP às concentrações em termos absolutos: os fatores de dispersão são empregados a fim de distribuir espacialmente os custos médios associados à emissão de uma unidade de poluente, em decorrência de impactos à saúde pública, numa abordagem *top-down*. Tais custos são ponderados pelo grau de ocupação nas células lindeiras, em pessoas*segundos, a fim de introduzir a dimensão da exposição aos poluentes nas estimativas finais de custos por grama de poluente emitido.

Zhang et al. (2013), por sua vez, consideram um modelo de dispersão em pluma com uma formulação mais sofisticada (TURNER, 1994, apud ZHANG et al., 2013) que

o apresentado na equação (3.3), contendo termos relativos à direção do vento, à cota das fontes emissoras e medidas de dispersão de alguns dos parâmetros da equação (e.g., desvio padrão da intensidade dos ventos). Ainda que os autores destaquem que a alta variabilidade da direção dos ventos deva ser contemplada no âmbito de sua pesquisa – o emprego de otimização semafórica voltada a mitigar exposições a EVP –, a introdução de variáveis desta natureza requer, além de o emprego de modelos de dispersão mais sofisticados, o emprego de dados de entrada adicionais e porventura de difícil obtenção, especialmente para análises em escalas espaciais reduzidas.

Para fins práticos, destaca-se a metodologia incremental empregada para a estimativa de concentrações a partir de estimativas de emissões no estudo de Zhang et al. (2013). Por incremental, refere-se ao fato de que a abordagem calcula o aumento das concentrações de poluentes provocado pelas EVP (i.e., a variação na contribuição), em vez de calcular diretamente a concentração resultante. Com efeito, em abordagens incrementais é possível partir de concentrações de fundo (e.g., medidas na madrugada, em condições de tráfego veicular desprezíveis) e construir perfis diários; ou, alternativamente, partir de concentrações na linha base para dado período e aplicar a análise incremental para estimar o impacto de variações no fluxo veicular sobre as concentrações finais. Uma abordagem incremental é também empregada em Wang et al. (2014), inspirada no modelo semiempírico proposto e validado por Dirks et al. (2002) para a relação entre emissões e concentrações de CO observadas em Hamilton, Nova Zelândia.

Complementarmente aos trabalhos citados, cabe expor a metodologia preconizada pelo Design Manual for Roads and Bridges¹³ - DMRB (HIGHWAYS AGENCY, 2007) para reprodução dos efeitos de dispersão de poluentes. Considerando uma velocidade média de ventos de 2m/s e sendo z a distância transversal em relação ao eixo da via, são propostas no DMRB as seguintes relações para cálculo da contribuição (incremental) do tráfego sobre as concentrações (TC_i , expressas em

¹³ O Guia de Avaliação de Impacto do Reino Unido (TAG, DfT, 2019), citado recorrentemente na presente pesquisa, remete ao referido Manual para reprodução dos efeitos de dispersão de poluentes.

aumento de concentração $\left[\frac{\mu g}{m^3}\right]$ por grama de emissão do poluente i , por $km \cdot hora^{14}$:

$$[2m < z \leq 5m]: \quad TC_i = 0,063541 \quad (3.5)$$

$$[5m < z \leq 168m]: \quad TC_i = 0,17887 + 0,00024 * d - \left(0,295776/d\right) + \left(0,2596/d^2\right) - 0,0421 * \ln(d) \quad (3.6)$$

$$[z > 168m]: \quad TC_i = [1,7675 - (0,0276173 * (d - 168))] * 10^{-3} \quad (3.7)$$

Trata-se de um padrão de contribuição estimado para o CO, com base em um modelo de dispersão atmosférica, que é sugerido pela publicação para emprego genérico a emissões de poluentes pelo tráfego rodoviário. O perfil proposto produz um decaimento não-linear com a distância, conforme ilustrado na Figura 3.3.

Em adição a este decaimento, é apresentada no DMRB (também citada em ZHANG e BATTERMAN, 2013) uma equação para relacionar concentrações de NOx (usualmente quantificado em modelos para estimativas de EVP) e de NO2 (principal componente nocivo à saúde humana, dentre os NOx), apresentada a seguir. Nota-se que a contribuição do tráfego à concentração final de NO2 esperada (i.e., $[NO_2]_{via}$) é calculada em função das emissões instantâneas (que influi através do termo $[NO_x]_{via}$) e da concentração de fundo (que, somada ao termo anterior, compõe o valor de $[NO_x]_{total}$).

$$[NO_2]_{via} = [NO_x]_{via} * [-(0,068 * \ln([NO_x]_{total}) + 0,53] \quad (3.8)$$

¹⁴ A unidade original utilizada no Manual é aumento de concentração por $g/km \cdot h$, em vez de g/h , como poderia ser esperado. Isto se dá pois o DMRB trata de estimativas de emissões ao longo de um segmento homogêneo de tráfego, de modo que as estimativas são parametrizadas pela extensão do segmento. Acima, reproduziu-se a formulação omitindo a dimensão de extensão ("km") da unidade para garantir a compatibilidade com as demais análises aqui apresentadas.

Figura 3.3: Contribuição do tráfego para a concentração de poluentes a diferentes distâncias do eixo da via

Fonte: Reproduzido de HIGHWAYS AGENCY, 2007

Com efeito, tanto as fórmulas empíricas preconizadas pelo manual britânico (HIGHWAYS AGENCY, 2007) quanto abordagens incrementais a partir de métodos semiempíricos (e.g., DIRKS et al., 2002) ou de simplificações da teoria de dispersões de poluentes (e.g., KICKHÖFER e KERN, 2015) apresentam-se compatíveis para análises locais de impacto de intervenções operacionais sobre o tráfego urbano. Conforme descrito na estruturação do modelo analítico (seção 4.4.3.1), optou-se pelo emprego da abordagem incremental introduzida pelo DMBR (HIGHWAYS AGENCY, 2007), indicada pelo DfT (2019), dada a sua tratabilidade analítica e sua compatibilidade com as etapas seguintes da modelagem e da avaliação de impactos.

3.3.2.2. Exposição a poluentes

No estudo de Alam et al. (2018) é empregado um modelo de LUR (*Land Use Regression*, ou regressão baseada no uso do solo, em tradução literal), tido como um modelo tipicamente aplicado em estimativas de concentrações de poluentes em escalas espaciais da ordem de cidades e regiões metropolitanas (ver também DONS et al., 2014). Tais modelos permitem uma composição flexível, podendo contemplar

variáveis de tráfego, meteorológicas, geográficas e termos de autocorrelação (ALAM et al., 2018).

Entretanto, tais modelos usualmente são empregados para escalas espaciais agregadas, considerando também variáveis de tráfego com maior grau de agregação (e.g., fluxo veicular horário a distintos raios de distância). Ainda que se trate de uma abordagem razoavelmente consolidada, tais modelos não apresentam a sensibilidade necessária para o emprego em avaliações de impacto de intervenções operacionais sobre o sistema de tráfego.

A partir das concentrações estimadas pelo modelo LUR, Alam et al. (2018) estimam exposições (ou dosagens, em tradução literal do termo original *dose*) a partir do produto entre concentrações e a taxa de inalação média ao longo do tempo, conforme apresentado na equação (3.9). Destaca-se que no referido estudo é computada apenas a exposição de indivíduos transportando-se, uma vez que o estudo busca explorar o impacto de considerar-se a exposição a poluentes na escolha de rota por usuários do sistema de transportes.

$$E_i = \int_{t_0}^{t_f} C_i(t) * I_m * dt \quad (3.9)$$

na qual,

E_i : exposição (ou dose) ao poluente i (em miligramas);

$C_i(t)$: concentração do poluente i enfrentada no instante t (miligramas por m³);

I_m : taxa de inalação de indivíduos do modo m (m³/hora, considerada como em média 0,57 m³/hora, para usuários de automóveis, no referido estudo);

t_0, t_f : instantes de início e fim do período de análise.

A formulação é análoga à apresentada e empregada por Wang et al. (2014), que também contemplam efeitos da poluição atmosférica apenas sobre viajantes em sua pesquisa. Num contexto de análise semelhante, Bigazzi e Figliozzi (2013) introduzem um termo referente à taxa de penetração dos poluentes no interior do veículo (P_i). Este termo representa a razão entre concentrações no interior e no exterior do veículo, considerado como em média 80% pelos autores (i.e., um valor razoavelmente próximo da unidade). Vardoulakis et al. (2008) também advogam em favor da indistinção prática entre concentrações em ambientes fechados e áreas externas, *ceteris paribus*,

propondo um fator de 90% para a razão entre concentrações dentro e fora de ambientes fechados. Andrade et al. (2017) citam evidências de concentrações de PM em ambientes fechados (*indoor concentrations*, em tradução livre) superiores a concentrações em ambientes externos (*outdoor concentrations*, em tradução livre), argumentando em favor da necessidade de estudos que visem proporcionar uma melhor compreensão da relação entre ambas. Com efeito, a eventual introdução do termo “ P_i ” resultaria na seguinte formulação:

$$E_i = \int_{t_o}^{t_f} C_i(t) * I_m * P_i * dt \quad (3.10)$$

Entretanto, a estimativa de exposições não deve mandatoriamente ser conduzida de forma explícita no processo de modelagem, da forma como exposto acima. De fato, esta etapa não se apresenta compatível com a metodologia empregada para a etapa seguinte (i.e., modelagem de efeitos sobre a saúde), que utiliza como parâmetro de entrada as concentrações de poluentes – conforme exposto no item a seguir.

Como alternativa, busca-se uma abordagem em linha com o indicado pelo COMEAP (2010) que, de forma análoga à abordagem preconizada pelo DfT (2019), produza como resultado uma medida de concentração – logo, de forma compatível com a etapa seguinte à modelagem da exposição a poluentes. Com efeito, a indicação do COMEAP é a de que seja calculada a concentração incremental média, ponderada pela população exposta.

Isto requer a compreensão da disposição espacial não só das emissões, mas também da densidade populacional (por segmento sociodemográfico, quando necessário), e consiste em uma abordagem naturalmente sensível ao local das fontes emissoras de poluentes e de especificidades da ocupação urbana presentes no contexto de cada cenário sendo avaliado.

3.3.2.3. Efeitos sobre a saúde

Por fim, para tradução da exposição a poluentes em efeitos finais, é necessário recorrer a literaturas complementares, consolidando métodos aplicados em estudos epidemiológicos ou avaliações econômicas de custos sociais associados à qualidade do ar local.

O parâmetro tipicamente empregado para estabelecimento da relação entre estímulo (e.g., exposições ou concentrações) e efeitos sobre a saúde é o RR (risco relativo, em tradução livre do termo *relative risk*) associado as concentrações de cada poluente (ABE e MIRAGLIA., 2016; PASCAL et al., 2013; WHO, 2013). O risco relativo representa a variação no risco de ocorrência de dado efeito sobre a saúde (em inglês, usualmente referido por *health endpoint*), em relação a linha base, dada uma variação na magnitude da exposição ao agente ou substância causador do referido efeito. Em outras palavras, é o incremento (ou decremento) no risco em relação ao cenário de referência.

Considerando que para populações (P) suficientemente grandes o risco (R) de ocorrência é equivalente à proporção de ocorrências (Y), podemos expressar o risco relativo matematicamente pela equação (3.11), na qual o índice “0” (zero) representa o valor de cada grandeza na linha de base:

$$RR = \frac{R}{R_0} = \frac{\frac{Y}{P}}{\frac{Y_0}{P_0}}; \quad P = P_0 \Rightarrow RR = \frac{Y}{Y_0} \quad (3.11)$$

Nota-se que, mantida a população constante ($P = P_0$), o RR representa a relação entre ocorrências antes (Y_0) e depois (Y) da variação na exposição. É possível encontrar na literatura internacional valores de referência para o RR, conforme o exposto na sequência deste item. O RR não é apresentado como uma função da exposição, mas sim parametrizado por unidades de medida de exposição. Em outras palavras, apresenta-se o RR como incremento (ou decremento) de risco por unidade adicional de exposição ou concentração a dado agente nocivo. Conforme antecipado, no caso específico de poluentes atmosféricos, tipicamente apresenta-se o RR por $10 \mu g/m^3$ incrementais na concentração dos poluentes (ABE e MIRAGLIA., 2016; COMEAP, 2010; PASCAL et al., 2013; WHO, 2006).

A partir do RR é possível obter modelos de estímulo-resposta na estrutura da equação (3.12), analogamente ao empregado em Abe e Miraglia (2016); Silva et al. (2012), Tang et al. (2014) e – sendo, no caso de Abe e Miraglia (2016), aplicado especificamente para o caso da RMSP, seguindo a metodologia empregada por Pascal, et al. (2013). As formulações apresentadas para curvas estímulo-resposta na bibliografia consultada apresentam pequenas distinções entre si, mesmo dentre os

quatro estudos citados neste parágrafo. Optou-se por reproduzir abaixo a formulação que respeitasse a propriedade incremental do risco relativo – isto é, que o resultado da avaliação do impacto de um dado incremento “ Δx ” fosse equivalente ao resultado estimado para dois incrementos sucessivos de $\frac{\Delta x}{2}$ – em linha com a interpretação de RR sugerida pelo COMEAP (2010).

$$\Delta y = y_0 * (e^{\beta * \Delta x} - 1) \quad (3.12)$$

$$\beta = \ln(RR) \quad (3.13)$$

nas quais,

y_0 : resultado sobre a saúde pública da linha de base (em mortes ou internações);

Δy : variação sobre a quantidade de ocorrências (em mortes ou internações);

Δx : variação sobre as concentrações de poluentes (em $10 \mu g / m^3$);

β : coeficiente de calibração da função estímulo-resposta;

Para análises locais, por sua vez, posto que não há necessariamente uma correlação direta entre local de exposição e local de internação ou morte numa escala espacial mais desagregada, é comum observar a aplicação de métodos *top-down*, como a metodologia empregada em Kickhöfer e Kern (2015) para distribuição do custo médio por unidade de poluente emitido. Nestas abordagens, são estimadas as ocorrências (ou custos) totais, e então distribuído o impacto total proporcionalmente a variáveis relacionadas às causas das ocorrências observadas – e.g., com base na exposição total, como no caso do estudo supracitado, ou com base nas emissões de poluentes, podendo-se alocar efeitos a cada modo de transporte que utiliza um mesmo segmento viário conforme sua contribuição em termos de EVP.

Alternativamente, é possível assumir que as taxas de mortalidade observadas ou estimadas para áreas agregadas (e.g., Município de São Paulo) sejam aplicáveis a subdivisões especiais da mesma (e.g., bairros do Município São Paulo). Entretanto, deve-se observar que este processo implica perda de precisão – perda de precisão esta que pode ser minorada ao considerar-se a transferibilidade da taxa de

mortalidade de forma mais detalhada, ou seja, considerando diferentes segmentos sociais (e.g., faixa etária, gênero, classe social).

Em uma abrangente consolidação acerca dos custos sociais da poluição atmosférica, é destacado por Hunt et al. (2016) que custos associados à morbidade usualmente representam menos de 10% dos custos associados à mortalidade, no âmbito dos impactos da poluição atmosférica – apesar de também destacar que custos associados à morbidade são mais facilmente sub-reportados e subestimados. Para fins de ilustração, a *Environmental Protection Agency*, dos EUA (2011) reportou, em seu *Clean Air Act*, estimativas de custos associados à morbidade representando 4% dos custos associados à mortalidade, sendo as principais componentes associadas a bronquite crônica e infartos não-fatais (EPA, 2011 *apud* Hunt et al., 2016). Em um estudo recente aplicado ao contexto nacional, as estimativas apresentadas por Vormitaag et al. (2018) resultam em custos de morbidade na ordem de 3% dos custos associados à mortalidade prematura.

Com base no reportado por Abe e Miraglia (2016), corroborado por ANTP (2018b) e Vasconcellos (2006) e apoiado pelas evidências supracitadas, a mortalidade é tida como a fonte de custos sociais associados à saúde mais significativa – e, como argumentado pelas autoras, também como o indicador de saúde pública mais robusto e de maior confiabilidade no que diz respeito à qualidade das estatísticas disponíveis, quando comparado a enfermidades e internações. Tais fatos justificam a consideração apenas de efeitos e custos relacionados à mortalidade em avaliações econômicas abrangendo os impactos da poluição atmosférica, contribuindo ainda para coibir uma superestimativa sistemática dos potenciais benefícios da redução da poluição atmosférica: uma característica identificada na publicação de Hunt et al. (2016) como desejável para a confiabilidade das estimativas e das conclusões derivadas a partir das mesmas.

Em linha com o praticado por Vormitaag et al. (2018), em um estudo para avaliação da introdução do biodiesel na matriz energética brasileira que aplica, para o PM, valores de RR apresentados pela WHO, são sumarizadas na Tabela 3.4 estimativas internacionais de referência de RR para os principais poluentes associados a danos à saúde humana. Nas equações propostas, a variável Δx representa a variação nas

concentrações do respectivo poluente e é medida em $10^{\mu g/m^3}$ (unidade de exposição referência empregada nas estimativas de RR consideradas).

Os valores são reproduzidos de WHO (2013), uma extensiva consolidação de estimativas disponíveis na literatura internacional, e complementados com uma estimativa recente produzida por Pope et al. (2019) a partir de uma meta-análise da produção científica dos últimos 25 anos associada ao tema. O enfoque, na reprodução apresentada, é a valores de RR aplicáveis a todas as causas de mortalidade associadas ao poluente e indivíduos de todas as idades, tanto para efeitos de curto prazo quanto para efeitos de longo prazo. Complementarmente, para estimativas de RR mais detalhadas (e.g., por causa de mortalidade; por grupo de risco), os leitores são remetidos ao estudo original publicado pela WHO (2013).

Tabela 3.4: Valores-referência de Risco Relativo (RR) para mortalidade (todas as causas; todas as idades) associados aos principais poluentes

Poluente	Medida de Exposição	Relative Risk (per $10^{\mu g/m^3}$)	Função de Estímulo-Resposta para a Mortalidade
$PM_{2.5}$ (longo prazo*)	Concentração média anual	1,062 ¹⁵ 1,08***	$\Delta y = y_0 * (e^{0,05846 * \Delta x} - 1)$ $\Delta y = y_0 * (e^{0,07696 * \Delta x} - 1)$ ***
$PM_{2.5}$ (curto prazo**)	Concentração média diária	1,0123	$\Delta y = y_0 * (e^{0,01222 * \Delta x} - 1)$
O_3 (curto prazo**)	Concentração diária máxima ao longo de período de 8 horas	1,0029	$\Delta y = y_0 * (e^{0,002986 * \Delta x} - 1)$
NO_2 (longo prazo*)	Concentração média anual	1,055	$\Delta y = y_0 * (e^{0,05354 * \Delta x} - 1)$
NO_2 (curto prazo*)	Concentração diária máxima ao longo de período de 1 hora	1,0027	$\Delta y = y_0 * (e^{0,002696 * \Delta x} - 1)$

Fonte: Elaborado pelo autor com base em fontes diversas (indicadas a seguir)

*efeitos de longo prazo de diferentes poluentes com elevado potencial de superposição; os efeitos de longo prazo são recomendados para avaliações econômicas, em detrimento dos de curto prazo –

Fonte: WHO (2013);

**aplicação não é diretamente complementar a estimativas de efeitos de longo prazo; há potencial de dupla-contagem – Fonte: WHO (2013);

***estimativa mais recente incluída complementarmente – Fonte: Pope et al. (2019)

¹⁵ Esta estimativa para mortalidade refere-se à população com mais de 30 anos.

Silva et al. (2012) destacam que o PM é recomendado pela Organização Mundial da Saúde como o indicador mais adequado, dentre os poluentes atmosféricos, para estudos de saúde pública. O DfT (2019) recomenda ainda que seja contemplado o poluente NO₂, em análises de impacto regional. Conforme elucidado anteriormente e destacado por Hunt et al. (2016), é atribuído ao O₃ impacto significativo à saúde humana, porém entende-se que este é negligenciado em avaliações de projetos de transportes (como o próprio Manual de Avaliação de Impacto publicado pelo DfT, 2019) devido à dificuldade de associar suas concentrações finais de forma objetiva a parâmetros operacionais do sistema de transportes e até a emissões de poluentes primários precursores do ozônio troposférico (ANTP, 2018b).

A publicação original que apresenta a maior parte dos valores sumarizados na Tabela 3.4 (WHO, 2013) destaca o risco de dupla-contagem de efeitos sobre a saúde, seja entre diferentes poluentes, seja entre diferentes horizontes de impacto de um mesmo poluente, assim como alertado por Hunt et al. (2016). Em particular, é recomendado pela WHO (2013) que avaliações de impacto de curto prazo do PM sejam realizadas apenas para fins de informação, uma vez que tais impactos podem potencialmente já estar contemplados nos impactos de longo prazo computados para o PM. No que diz respeito ao NO₂, os autores destacam a possibilidade de dupla-contagem de efeitos tanto no longo prazo quanto no curto prazo.

Destaca-se que parâmetros para o SO₂ não são apresentados uma vez que as referências consultadas não dispunham de estimativas para o mesmo. Deve-se ter em vista ainda que, como argumentado por Motta e Mendes (1994), o mesmo encontra-se em situação controlada desde o final do século XX, representando atualmente risco significativamente inferior aos demais poluentes elencados ao final do item 2.3.2.

Com base no exposto, o modelo analítico contempla exclusivamente os impactos provocados pelas concentrações de PM em termos de mortalidade, conforme descrito na seção 4.4.3. Por fim, no que diz respeito a aspectos práticos da aplicação destes valores, destacam-se algumas informações de cunho prático:

- Parte das publicações refere-se a $PM_{2.5}$, parte refere-se a PM_{10} , e parte menciona os materiais particulados de forma genérica. Medições nem sempre abrangem $PM_{2.5}$ diretamente, mas sim o PM_{10} , devido a condicionantes tecnológicos. Como regra geral, posto que os PM_{10} contém os $PM_{2.5}$,

empregam-se aproximações quando se faz necessário converter medidas de um em outro, considerando-se proporções entre 50% e 70% para a razão $\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}$ (MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014; ABE et al., 2016; ANTP, 2018b).

- No que diz respeito ao ozônio troposférico, Pascal et al. (2013) destaca registros de valores para a relação $\frac{[O_3]_{8h}}{[O_3]_{1h}}$ de 88%, caso seja necessário o emprego de aproximações neste sentido.
- As aplicações são relativas a eventos da linha base. Para tanto, é necessário recorrer a estudos que se baseiem em dados locais para o estabelecimento de estimativas da linha base (totais ou atribuíveis à poluição do ar), como abordado em Abe e Miraglia (2016); Miraglia et al. (2005), para o caso de São Paulo.

3.4. Valoração do Custo Social de Emissões de Poluentes Atmosféricos

Métodos de valoração dos custos sociais associados a emissões de poluentes atmosféricos representam um tema suficiente complexo *per se*. Não é objetivo da presente pesquisa explorar o tema em profundidade, mas sim revisar estimativas disponíveis na literatura, suas premissas, e, finalmente, as parametrizações usualmente consideradas como dados de entrada para estimativas dos custos sociais finais (e.g., emissões; concentrações; exposições). A título de referência, no que diz respeito a revisões sobre métodos de valoração tipicamente empregados na literatura nacional, os leitores são remetidos a Motta (1997) e Rocha et al. (2019).

As estimativas de custo aqui apresentadas são usualmente estimadas (i) a partir de valoração baseada em custos (*cost-based methods*, em tradução livre, referidos por “impactos reais” em Vasconcellos, (2006)), para impactos tangíveis (e.g., internações hospitalares; prevenção contra eventos extremos); ou (ii) a partir de métodos de valoração contingente ou de preços hedônicos, especialmente para custos intangíveis (e.g., valor atribuído ao capital ambiental; redução do risco de contração de doenças ou de mortalidade). Como desenvolvido nas seções anteriores, as estimativas de impacto são apresentadas individualmente por escala de efeito (i.e., global e local).

3.4.1. Efeitos em escala global

Os efeitos globais representam uma componente recente dos custos sociais associados a emissões de poluentes atmosféricos, em contraste aos efeitos locais.

Vasconcellos e Lima (1998), uma fonte clássica da literatura nacional para custos externos dos sistemas de transportes, não apresentavam efeitos climáticos dentre os principais efeitos externos no final do século XX, enquanto já era possível encontrar algumas menções sobre estes efeitos na literatura internacional contemporânea da área de transportes (e.g., MAYERES et al., 1996). Em referências nacionais mais recentes (VASCONCELLOS, 2006), nota-se que tal efeito passa a ter maior grau de destaque em publicações da mesma linha de abordagem.

Por tratar-se de um efeito em escala global, e cujos impactos incidem de forma tipicamente difusa (e.g., elevação do nível dos oceanos), considera-se razoável a transferibilidade direta de estimativas internacionais para emissões produzidas em território nacional.

Macedo (2014) reproduz valores apresentados por IWG-SCC (2013) referentes a custos por tonelada de CO₂ equivalente (CO₂eq), do ponto de vista de seu impacto sobre mudanças climáticas. As estimativas média e do 95º percentil, considerando uma taxa de desconto social de 3%, são de 39 US\$/ton e 116 US\$/ton (valores de 2011), respectivamente (estimativas para o ano de 2015). O autor destaca que a estimativa média não inclui custos associados a ocorrência de eventos climáticos extremos, estando este efeito melhor contemplado na estimativa do 95º percentil.

A estimativa superior apresentada acima (i.e., 116 US\$/ton) é de fato mais próxima de estimativas médias apresentadas no SIMOB – Sistema de Informação da Mobilidade Urbana (ANTP, 2018b), consolidadas a partir de referências europeias (RICARDO-AEA, 2014). A estimativa média apresentada neste é de 89,46 €/ton, bastante próxima à apresentada no parágrafo anterior como 95º percentil. A publicação nacional, por sua vez, corrige as estimativas internacionais pela inflação europeia e, então, através da relação de PPP (*purchase-power parity*, ou paridade de poder de compra) entre União Europeia e Brasil, resultando nas estimativas apresentadas na Tabela 3.5, em valor corrente da moeda local. Considerou-se que tais valores (apresentados em R\$ de 2013) representem a melhor estimativa nacional disponível para valoração do impacto ambiental global da emissão de uma tonelada de CO₂eq, tendo sido adotados nos exercícios práticos desenvolvidos.

Tabela 3.5: Custos estimados associados ao impacto climático da emissão de 1 tonelada de CO₂eq (*Social Carbon Cost – SCC*)

Estimativa	Custo por tonelada de dióxido de carbono equivalente emitida (R\$/ton)
Baixa	101,63
Média	190,55
Alta	355,70

Fonte: ANTP (2018b); baseado em RICARDO-AEA (2014)

3.4.2. Efeitos em escala local

Complementarmente à abordagem do item 3.3.2, é abrangida neste item a valoração atribuída a mortalidades, exclusivamente – juntamente de valorações atribuídas a emissões de poluentes de forma direta (i.e., custo por unidade de poluente emitida, sem parametrização por fenômenos subsequentes a sua emissão), desde que feitas sob o prisma de seu impacto sobre a saúde humana.

Uma das principais dimensões do problema de valoração de impactos locais de EVP consiste na atribuição do valor a perda da vida humana (referido por “valor da vida”, VV, ou “valor da vida estatístico”, segundo Vasconcellos (2006) – tradução livre do termo *Value of a Statistical Life*, ou VSL, na sigla em inglês). Diferentemente das estimativas de valoração de efeitos globais, é importante capturar nas estimativas peculiaridades locais que influam nas estimativas de impacto e custos. No publicado pelo IPEA (ROCHA et al., 2019) são destacadas a complexidade e a intensidade do esforço envolvido na elaboração de tais estimativas, defendendo a importância da disponibilização em literatura de estimativas *plug-ins*: estimativas parametrizadas previamente existentes e disponíveis para uso.

No caso do VV, a principal componente considerada na estimativa é a perda de produtividade econômica, podendo ser incluída ainda componentes associadas a aspectos intangíveis, como o sofrimento a familiares e a disposição a pagar por precaver-se contra a morte – ainda que, conforme ilustrado por Vasconcelos (2006), a inclusão destas componentes possa substancialmente aumentar as estimativas e potencialmente torná-las inconsistentes. No estudo recente realizado por Rocha et al. (2019) para a consolidação de estimativas nacionais do VV, são destacados três enfoques mais comuns para tal tarefa: (i) disposição a pagar; (ii) renda perdida (*foregone output approach*, em tradução livre); e (iii) custo das doenças (ROCHA et

al., 2019). Entende-se como grande distinção o fato de o primeiro método captar os supracitados aspectos intangíveis, ao passo que os segundo e terceiro enfoques são baseados na contabilização de efeitos tangíveis (i.e., *cost-based methods*), como perda de produtividade laboral e custos hospitalares.

Estimativas mais recentes publicadas pelo IPEA (ROCHA et al., 2019) apontam para VV entre R\$ 2,17 milhões e R\$ 3,93 milhões (em valores de 2017) e são baseadas em métodos de valoração contingente, isto é, estimativas de disposição a pagar. A metodologia baseia-se em uma meta-análise de estimativas internacionais e as transfere ao caso nacional com base na relação do PIB *per capita* entre as diferentes nações e o Brasil. Uma vez que, conforme citado por Vasconcelos (2006), tais estimativas tendem à superestimativa, o limite inferior potencialmente apresenta-se como estimativa mais prudente de se adotar na avaliação econômica de projetos.

Complementarmente, ANTP (2018b) obteve em estudo recente o resultado de R\$ 1,669 milhões (em valores de 2013) como estimativa nacional do valor da vida estatístico. A metodologia consiste, similarmente, de uma meta-análise envolvendo estimativas internacionais realizadas com base em métodos de preferência declarada e revelada (MILLER, 2000, *apud* ANTP, 2018b), seguida da correlação das estimativas com o PIB *per capita* das regiões, visando a transferibilidade das estimativas, e, finalmente, da aplicação dos devidos ajustes monetários e cambiais. Entende-se que as estimativas de ANTP (2018b) e Rocha et al. (2019) se sustentam mutuamente, ao postular-se que as divergências entre os valores residam na dimensão dos ajustes monetários em cambiais: além de ser necessário corrigir pela inflação os valores estimados pela ANTP (2018b), a relação cambial real-dólar americano era substancialmente mais parelha em 2013 que em 2017, com o dólar americano valendo cerca de 50% mais da moeda brasileira em 2017 (comparativamente a 2013).

Todavia, destaca-se que o conceito de VV pode introduzir imprecisões na compreensão dos fenômenos relevantes e em sua valoração. Conforme destacado pelo COMEAP (2010), a redução da poluição não evita a mortalidade, mas posterga-a – de modo que não se salva vidas com a redução da poluição, mas sim se proporciona anos adicionais de vida saudável. Esta dicotomia torna-se particularmente relevante à medida que estão em questão efeitos sobre pessoas de idade avançada, conforme destacado por Abe e Miraglia (2016) para o contexto de avaliações de impacto da

poluição do ar sobre a saúde. A questão é ilustrada na sequência deste item, sendo possível ter uma percepção quantitativa por meio dos dados apresentados na Tabela 3.6, adiante.

Deste ponto de vista, são mais adequadas abordagens como a metodologia DALY (*Disability Adjusted Life Years*, ou Anos de Vida Perdidos ou Vividos com Incapacidades, segundo MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014). A metodologia, empregada de forma generalizada em estudos, inclusive no contexto nacional (e.g., ABE e MIRAGLIA, 2016; MIRAGLIA et al., 2005; MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014), foi elaborada pela WHO e pelo Banco Mundial como uma iniciativa para padronização das estimativas mundiais de valoração de impactos sobre a saúde (ABE e MIRAGLIA, 2016). A metodologia estabelece duas componentes de perda de produtividade: os YLL (*years of life loss*, ou anos de vida perdidos, em tradução livre), associada à mortalidade prematura; e os YLD (*years of life lived with disability*, i.e., tempo vivido com saúde que não em estado ideal, em tradução livre), associada a morbididade – sendo a primeira abrangida na presente pesquisa, exclusivamente, pelas razões citadas no início deste item.

As estimativas levam em conta a expectativa de vida a cada faixa de idade, a fim de que se atribua valores de YLL especificamente para cada registro de morte prematura, conforme a idade dos indivíduos e a respectiva expectativa de vida então. Para avaliações agregadas, nas quais as estimativas de eventos não se distinguem por causa, e a quantidade de ocorrências não é desagregada por segmento da população afetada, postula-se que seja adequado empregar um valor médio de YLL por registro de morte, calculado com base nos dados desagregados apresentados no estudo citado (Tabela 3.6). Destaca-se que esta aproximação implicaria perda de sensibilidade a exposições e efeitos sobre grupos de risco específicos (e.g., crianças; idosos).

Tabela 3.6: Passivos de saúde pública atribuíveis a poluição atmosférica: mortalidade e YLL

Causa de mortalidade	Mortes atribuíveis a poluição atmosférica (M)	YLLs atribuíveis a poluição atmosférica (YLL)	Média de YLL por evento (YLL/M)
Doenças respiratórias em idosos	628	2.467	3,93
Acidentes vasculares cerebrais em idosos	193	1.862	9,65
Doenças cardíacas em idosos	541	5.219	9,65
Doenças respiratórias em crianças	294	4.742	19,1
Total	1.656	14.290	8,63*

Fonte: Miraglia et al. (2005), Tabela 3 (dados referentes à década de 1990, abrangendo o período de um ano);

*Dado não fornecido na publicação original, mas aferido pelo presente autor

Para fins de reduzir a variabilidade do dado apresentado, explorou-se a literatura nacional relacionada para identificação de referências adicionais. A Tabela 3.7 sumariza os valores identificados. Incluiu-se, ainda, a valoração atribuída aos anos de vida perdidos (YLL) em cada estudo – ou, quando não disponível detalhe suficiente, incluiu-se a valoração atribuída a cada morte prematura evitada, que consiste no produto entre o VOLY e os anos de vida perdidos por evento de mortalidade prematura (YLL/evento).

Tabela 3.7: Consolidação de valores de referência para valoração de impactos de EVP sobre a saúde pública

Indicador	Miraglia et al. (2005)**	Miraglia e Gouveia (2014)*	Abe e Miraglia (2016)	Vormittag et al. (2018)
VOLY	N/D-	6,50 mil US\$/YLL	56,6 mil US\$/YLL	N/D
YLL por morte associada ao $PM_{2.5}$	8,63 YLL/evento	12,3 YLL/evento	52,6 YLL/evento	N/D
Custo social associado (VOLY*YLL/evento)	N/D	79,8 mil US\$/evento	2,97 milhões US\$/evento	83,7 mil US\$/evento

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir das referidas fontes

*Valores médios para população acima de 30 anos

**Abrange apenas crianças e idosos, não abrangendo adultos jovens

Uma vez que as estimativas de efeitos em escala local descritas no item 3.3.2 resultam em estimativas de acréscimo (ou redução) na mortalidade, o parâmetro

médio de interesse é o produto entre YLL/evento e VOLY, o que se traduz em uma medida de custo social decorrente de cada morte adicional – exceto em avaliações que distingam a mortalidade dentre os diferentes segmentos sociais. Para os exercícios desenvolvidos na presente pesquisa, descritas em detalhe a partir do Capítulo 4, adota-se a mediana dos valores reportados na Tabela 3.7 para o termo $VOLY \times YLL/\text{evento}$, equivalente a 83,7 mil US\$/evento (em US\$ de 2014).

A estimativa supracitada não detalha os valores de YLL e VOLY em que se baseia. A título de discussão, tal estimativa é próxima à estimativa de VOLY de menor valor, que por sua vez é associada à mediana dos valores de YLL/evento encontrados (i.e., as estimativas adotadas por MIRAGLIA e GOUVEIA, 2014, correspondente a 12,3 YLL/evento). Desta forma, entende-se que o emprego da referida valoração potencialmente evita superestimativas na valoração de tais efeitos, contribuindo para a obtenção de resultados razoáveis por parte dos exercícios práticos. Destaca-se que no caso específico do PM, tendo em vista que a mortalidade associada se concentra na população de idade superior a 30 anos (COMEAP, 2010), o fato de os resultados de Miraglia e Gouveia (2014) concentrarem-se neste segmento social (i.e., adultos com 30 ou mais anos) é tido como pertinente e compatível com as comparações feitas na Tabela 3.7.

Pode-se notar que mortes prematuras atribuíveis às concentrações de material particulado passam a ser avaliadas a um valor significativamente inferior ao patamar das estimativas de VV apresentadas nos parágrafos anteriores (i.e., R\$ 2,17 milhões, na estimativa mais baixa dentre as apresentadas por ROCHA et al., 2019). Os valores de $VOLY \times YLL/\text{evento}$ resultam cerca de 8 vezes inferiores aos valores de VV. A título de comparação, a razão entre a mediana de YLL associados a mortes prematuras no caso das estimativas analisadas (i.e., 12,3 YLL/evento) e a expectativa de vida dos brasileiros ao nascer (i.e., 76,3 anos, segundo o IBGE, 2020) resulta em ordem de grandeza similar.

Alternativamente, é possível atribuir valores médios a poluentes, como apresentado em Vasconcellos (2006) e reproduzido na Tabela 3.8. Tal abordagem é similar à preconizada no manual estadunidense de avaliação de projetos de transportes, que atribui custos médios por veículo*quilômetro por modo, em vez de associar custos a cada poluente (AASHTO, 2010). Os valores são apresentados com

fins ilustrativos, uma vez que tal abordagem provoca perda de sensibilidade à exposição efetiva a poluentes, e não é aconselhada quando deseja-se contemplar em maior nível de detalhe esta dimensão do problema.

Tabela 3.8: Custos médios ocasionados por poluentes atmosféricos estimados para a saúde no Brasil

Poluente	Custos médios para a saúde (R\$/ton)
<i>CO</i>	727
<i>HC</i>	3.221
<i>NO_x</i>	3.728
<i>PM</i>	19.062
<i>SO_x</i>	14.182
<i>CO₂</i>	116

Fonte: Vasconcellos (2006) – estimativas para 2005

Nota-se que os valores atribuídos ao PM parecem subestimados se comparados a fontes mais atuais, como os apresentados em Kickhöfer e Kern (2015), talvez pela relativa desatualização do estudo citado. Todavia, destaca-se novamente que a transferibilidade de estimativas de custos associadas a efeitos locais não é direta como às associadas a efeitos globais – fato especialmente válido para estimativas agregadas e efeitos locais, nas quais as características do contexto da estimativa original estão implicitamente sendo consideradas e replicadas.

4. MODELO ANALÍTICO

Este capítulo tem o objetivo de detalhar o modelo analítico desenvolvido no âmbito da presente pesquisa, descrevendo tanto o arcabouço conceitual quanto a metodologia que sustentam seu desenvolvimento. Antes da discorrer sobre o modelo propriamente dito, apresenta-se uma introdução acerca dos exercícios práticos que motivaram seu desenvolvimento.

4.1. Introdução aos Exercícios Práticos

Como destacado nos capítulos anteriores, encontra-se disponível na literatura um conjunto de estudos que avaliam e verificam o potencial de medidas de gestão de tráfego como estratégias para mitigação das emissões veiculares de poluentes, juntamente de pesquisas (e estudos de caso) atestando a eficácia da priorização do transporte coletivo na redução das ineficiências e deseconomias presentes no transporte urbano (estas usualmente advindas da presença de externalidades), de modo geral. Identifica-se, entretanto, uma desconexão entre ambas as frentes de conhecimento, isto é, uma compreensão limitada sobre o potencial papel da priorização ao transporte coletivo por ônibus (TCO) como estratégia de mitigação de emissões veiculares de poluentes (EVP) e suas externalidades, em particular.

4.1.1. Síntese crítica da revisão bibliográfica

No estudo desenvolvido por Basso et al. (2011), os resultados indicam uma preferência pela implementação de faixas exclusivas para TCO, uma medida de Engenharia, em detrimento de medidas econômicas – no caso, subsídios ao TCO ou cobrança pelo congestionamento (*congestion charging*, em tradução livre) de veículos de transporte individual por automóveis (TIA) –, quando levados em conta aspectos como apoio político popular (medido pelo bem-estar dos usuários) e benefícios econômicos líquidos (medido pelo bem-estar global). As demais alternativas são criticadas, ainda, com relação a aspectos práticos de sua implementação: a prática de subsídios ao TCO requer disponibilidade de recursos externos ao sistema, ao passo que a prática de cobrança pela circulação ao TIA impõe requerimentos ainda mais complexos, como mecanismos eficientes de reciclagem e reaplicação de impostos (que se contrapõe à usual ineficiência de gestões de fundos públicos) e baixos custos

operacionais para coleta das tarifas (aspecto dificilmente atingido, como destacado por Prud'homme e Bocarejo (2005) para o caso de Londres). O trabalho de Basso e Silva (2014), desenvolvido alguns anos depois, reforça a conclusão de que a provisão de prioridade de circulação ao TCO tende a ser um substituto efetivo de medidas como cobrança pelo congestionamento ou subsídios ao TCO, sem requerer a injeção de fundos públicos ou depender da referida reciclagem de impostos, sendo especialmente mais vantajosa, em termos de benefício social, em um contexto de país em desenvolvimento (representado pela cidade de Santiago, Chile, no referido estudo).

Trata-se de uma conclusão importante, que contempla aspectos conceituais e práticos a respeito da mitigação de ineficiências no transporte urbano e promove respaldo técnico para que planejadores de transportes possam enfrentar a típica resistência encontrada em iniciativas de reservar espaço público a modos de transporte coletivo e privar o transporte individual privado de seu uso. Adicionalmente, a conclusão destaca o potencial prático de medidas de Engenharia no endereçamento de falhas de mercado (e.g., presença de externalidades), mostrando-se superior ao das medidas baseadas na teoria econômica, no estudo citado.

Um estudo de natureza similar, porém voltado para o transporte individual (KONISHI et al. 2010), realizou a comparação entre a implementação de faixas exclusivas para veículos com alta ocupação (*high-occupancy lanes* ou *carpooling lanes*, em tradução livre) e cobrança pelo congestionamento, utilizando modelos estilizados similares ao de Basso et al. (2011). Todavia, entende-se que a consideração mais precisa de fenômenos operacionais seja mais relevante para o caso de Basso et al. (2011) que para o referido estudo, uma vez que no caso avaliado por Konishi et al. (2010) a heterogeneidade da frota não é um aspecto de mesma relevância. Posto que tanto usuários das faixas para HOV quanto usuários das demais faixas de tráfego são predominantemente automóveis, as imprecisões e aproximações afetam de forma semelhante os cálculos relativos a ambas, o que reduz o potencial de introdução de vieses sobre a conclusão obtida pelo método de avaliação (i.e., o modelo de tráfego) empregado. Destaca-se ainda que Konishi et al. (2010) não obtiveram a mesma conclusão em favor da medida de Engenharia, mas sim que a opção por medidas de Engenharia (faixas de HOV) ou de Economia (cobrança pelo congestionamento) é fortemente dependente do contexto – aspecto que não fora

esgotado ou explorado por Basso et al. (2011), em relação à conclusão obtida, uma vez que as análises resumiram-se a um contexto genérico único.

Num segundo momento, é necessário contemplar não só efeitos contidos no sistema de transportes, mas também efeitos sobre o ambiente no qual o mesmo se insere, como os discutidos nos itens 2.3.1 e 2.3.2. Em relação aos efeitos ambientais, o que se destaca são alguns aspectos não intuitivos associados ao seu impacto e a sua avaliação. Há distinções, por exemplo, na natureza das externalidades provenientes de congestionamentos, em relação às associadas às EVP. As associadas a congestionamentos, por definição, incidem apenas em períodos de sobrecarga do sistema viário, podendo resumir-se a algumas horas do dia. As EVP, por sua vez, ocorrem de forma perene ao longo do dia, não sendo totalmente dependentes de congestionamentos, conforme destacado por Zhang e Batterman (2013). Esta colocação indica que aspectos que mitiguem congestionamentos não necessariamente atingirão externalidades ambientais com a mesma qualidade (e vice-versa), além de sugerir que avaliações com enfoque em EVP e seus efeitos não devam necessariamente ter enfoques similares ao das avaliações focadas em mitigar ineficiências advindas de congestionamentos.

Outra decorrência da visão apresentada por Zhang e Batterman (2013) sobre as externalidades ambientais é que apenas parte destas é mitigável a partir de melhorias puramente operacionais, como a mitigação de congestionamentos. Para uma maior eficácia das medidas, efeitos de segunda ordem advindos da priorização de circulação ao TCO, como migração modal, devem idealmente ser almejados (e, complementarmente, contemplados em avaliações) para que o potencial destas medidas seja percebido e realizado. A título de ilustração, destaca-se que após implementações recentes de uma série de faixas exclusivas para circulação de ônibus na cidade de São Paulo, a CET-SP (2016) identificou registros de migração modal de em média 24%, dentre os usuários de ônibus em corredores específicos no período corrente, após a implantação de tais medidas, dentre os quais 48% provenientes dos automóveis. A pesquisa identificou ainda que nos picos de registros de migração modal, a participação do metrô como modo original atingiu picos de até 57%, indicando que sistemas de TCO possam competir, em termos de atratividade aos usuários, com sistemas de transporte público baseados em trilhos. De modo geral, o

referido estudo indica que tais efeitos de segunda ordem são pretensões factíveis ao serem proporcionadas melhorias operacionais de relativo baixo custo de implementação aos sistemas de TCO.

Em adição ao exposto, destaca-se que a magnitude das externalidades ocasionadas por emissões não é uma resposta apenas a aspectos quantitativos do sistema de transportes, mas também a aspectos distribucionais (e.g., em termos espaciais e temporais) – dimensão esta que pode, juntamente dos efeitos de segunda ordem mencionados, afetar a potencial efetividade de medidas operacionais como estratégias de mitigação de externalidades ambientais (ampliando-a ou limitando-a).

Este aspecto é ilustrado, por exemplo, no estudo de Alam et al. (2018), no qual é avaliado o impacto de se considerar diferentes componentes de custos privados na escolha de rotas, por usuários de transporte individual, introduzindo-se a componente de custos à saúde devido à exposição à poluição. As diferenças entre trajetos e custos associados em cada cenário não são desprezíveis, mas ainda mais importante é a demonstração prática de que diferentes fatores regem cada fenômeno (e.g., congestionamentos, emissões, exposição a poluentes) e que as conclusões de abordagens normativas são dependentes do enfoque empregado (i.e., o efeito que se busca mitigar).

O estudo de Kickhöfer e Kern (2015) ilustra isso de forma particularmente interessante. A pesquisa consiste em avaliar o impacto de diferentes premissas para valoração do custo de cobrança pelo congestionamento (numa abordagem conhecida como *first-best toll charging*, na qual são estabelecidas cobranças individualmente em todos os segmentos da rede viária, permitindo ainda a diferenciação de cobrança por segmento de demanda) na Região Metropolitana de Munique, Alemanha. O referido estudo compara os resultados de abordagens que visam mitigar emissões às abordagens que visam mitigar a exposição – neste, em contraponto ao estudo de Alam et al. (2018), contemplando a exposição não só de usuários do sistema de transportes, mas também ocupantes do meio urbano (*urban dwellers*, em tradução livre).

As conclusões mostram que as abordagens produzem efeitos substancialmente diferentes. Observa-se que reduzir emissões não reduz exposições necessariamente, e vice-versa. No caso da cobrança baseada em emissões, veículos de transporte de cargas acabaram por ser os mais afetados, posto que estes poluem mais por veículo*quilômetro (no estudo, resultando em uma tarifa por quilômetro 10 vezes

superior). Já no caso da cobrança por exposição, isto passa a ocorrer com usuários da malha urbana central, dado que são os que trafegam por áreas mais densamente ocupadas. Como ilustração do efeito efetivo da cada política de cobrança, destaca-se que a cobrança baseada em emissões levou veículos de transporte de carga (usualmente associados a deslocamentos de longa distância) a buscarem rotas mais curtas e, assim, implicaram um aumento da exposição total dos indivíduos (a poluentes produzidos por este segmento de demanda); alternativamente, a cobrança baseada na exposição impôs que este mesmo segmento de veículos optasse por desviar de regiões densamente ocupadas, implicando rotas mais longas e um efetivo aumento das emissões totais oriundas deste segmento neste cenário – indicando que políticas de mitigação de efeitos locais possam ser conflitantes, em algum nível, com políticas de mitigação de efeitos globais.

Por fim, destaca-se que a cobrança baseada em exposição impôs grandes variações nas tarifas efetivas, de forma proporcional à proximidade dos segmentos viários ao centro da aglomeração urbana, ao passo que no cenário de cobrança baseada em emissões, estas variações foram relativamente desprezíveis. Em termos globais, a cobrança por emissões gerou maior cobrança total, ao passo que a cobrança por exposição se concentrou, quase que em sua totalidade, em segmentos viários próximos da área central e mais densamente ocupada da aglomeração urbana. Isto indica potenciais distinções no enfoque prático (e.g., abrangência espacial) que estratégias de mitigação de externalidades ambientais devam ter, a partir do efeito que se busca prioritariamente mitigar.

O exposto argumenta em favor da necessidade de explorar em maior grau de profundidade o impacto de medidas de gestão de tráfego e demanda (e.g., priorização de circulação ao TCO), introduzindo-se a dimensão de efeitos externos associados a poluentes atmosféricos (e avaliando seus impactos adequadamente), dados os indícios de sua relevância em meios urbanos e a limitada correlação da magnitude destes efeitos com as demais externalidades usualmente avaliadas (dentre as quais os congestionamentos).

4.1.1.1. Modelos analíticos estilizados

A exploração analítica de modelos de sistemas de transporte tem precedência tanto no campo da Economia dos Transportes (e.g., VICKREY, 1969; MOHRING,

1972; JANSSON, 1980), quanto no campo da Engenharia de Transportes, vinculada a esforços dirigidos à modelagem de transportes (e.g., WARDROP, 1952; MURCHLAND, 1970; SHEFFI e DAGANZO, 1978). Os modelos analíticos baseiam-se em combinações de simplificações metodológicas que garantem tratabilidade analítica ao problema matemático, ao custo de perdas de precisão possivelmente relevantes, e apoia-se na representação dos fenômenos e efeitos principais para permitir a compreensão dos produtos das interações entre as diversas componentes do problema sob diferentes cenários.

Na presente dissertação, opta-se por explorar modelos analíticos em linha com os explorados em Basso et al. (2011) e Basso e Silva (2014), buscando combinar linhas de pesquisa de ambos os campos supracitados, considerando que tais modelos analíticos representam esforços relevantes no sentido de integrar aspectos de engenharia e aspectos econômicos em um único modelo. Baseia-se nestes dois trabalhos, em vez de em trabalhos mais recentes da mesma linha de pesquisa (e.g., BASSO et al., 2019), por considerar-se que a evolução da linha de pesquisa foge ao tema que a presente dissertação busca endereçar. Em específico, considera-se que o emprego de uma abordagem dinâmica aos congestionamentos (BASSO et al., 2019) – principal distinção metodológica presente nos trabalhos mais recentes – traz um aumento de sofisticação ao modelo analítico sem gerar distinção relevante às conclusões dos trabalhos que utilizaram formulações estáticas para tal fim (BASSO et al., 2011; BASSO e SILVA, 2014).

Em síntese, os modelos de referência consistem em modelos que consideram representações estilizadas da demanda por transportes (e.g., modelo comportamental de bases microeconômicas; demanda uniformemente distribuída) e do sistema de transportes (e.g., segmento viário homogêneo; seleção específica de modos de transportes disponíveis). Em adição à representação destas componentes do problema, o modelo também abarca uma representação do planejador central do sistema, que é responsável por definir parâmetros do sistema de transportes (e.g., tarifas e subsídios, frequência dos serviços de TCO, emprego de faixa exclusiva ao TCO) visando maximizar o bem estar social – e o faz considerando as interações entre demanda e operação dos modos de transportes, tanto em função do equilíbrio entre as decisões dos usuários (e.g., quantidade de viajantes, escolha modal) e as

características operacionais do sistema (e.g., capacidade viária, tarifas por modo) quanto como decorrência dos estímulos promovidos pelo próprio planejador.

Mais detalhes conceituais e formais sobre a referida linha de modelos podem ser encontrados nas publicações originais, naturalmente, sendo também destacados ao longo da descrição do modelo analítico empregado na presente pesquisa, na sequência deste capítulo.

4.1.2. Abordagem proposta

Partindo do modelo proposto por Basso e Silva (2014), a principal dimensão que se busca introduzir, em adição aos aspectos já abrangidos, é o cômputo das externalidades associadas às EVP, buscando compreender qual sua influência sobre a validade das conclusões previamente obtidas, postos os crescentes indícios da grande relevância de tais externalidades em contextos urbanos (cf. item 1.2). Tal dimensão (e suas sub-atividades, conforme sumarizado no início da seção 3.3.2) foi incorporada à estrutura do modelo buscando torná-lo sensível às principais características do problema e das intervenções em análise, bem como perseguindo o princípio de garantir a tratabilidade analítica da representação (ou modelagem) dos fenômenos associados.

Adicionalmente, foram realizadas adaptações pontuais sobre a estrutura do modelo, conforme identificado como necessário para que o modelo servisse adequadamente para o fins da presente pesquisa, tais quais:

- Introdução de abordagens mais precisas para modelagem do desempenho operacional de sistemas de TCO, como a consideração do rendimento apropriável nos períodos de pico e da capacidade de pontos de embarque e desembarque sob um contexto de um corredor de TCO de alta capacidade (cf. item 2.1);
- Representação da pendularidade da demanda, por meio da representação dos sentidos individualmente, de modo a considerar a real participação dos sentidos dominantes nos períodos de pico na composição dos resultados relativos aos horizontes de análise (e.g., dias, anos);
- Variações pontuais na especificação dos submodelos (e.g., de tráfego, de demanda, de planejamento) visando contemplar fenômenos de forma mais precisa ou negligenciar fenômenos e aspectos considerados secundários.

Em suma, os exercícios propostos e desenvolvidos na sequência da dissertação consistem em explorar um modelo analítico estilizado, considerando um trecho homogêneo de corredor rodoviário hipotético com demanda uniformemente distribuída ao longo do mesmo. O modelo é caracterizado com base nos parâmetros observados ao longo do Corredor Rebouças (cf. item 4.1.3), considerando a presença de dois modos de transporte compartilhando o espaço viário e interferindo no desempenho individual de cada modo e, por conseguinte, no desempenho do sistema.

Esta proposta almeja permitir a obtenção de resultados indicativos acerca do desempenho de intervenções sobre corredores de TCO, complementando conclusões previamente obtidas em pesquisas similares (e.g., BASSO et al., 2011; BASSO e JARA-DIAZ, 2012; GONZALES e DAGANZO, 2012; BASSO e SILVA, 2014; AMIRGHOLY e GONZALES, 2017; WANG et. al, 2017; BASSO et al., 2019) especialmente no tangente aos efeitos associados às EVP e a imprecisões decorrentes de simplificações empregadas em estudos prévios. Busca-se, avaliar sob esta ótica, tipologias distintas de intervenções, incluindo intervenções de cunho tecnológico e de cunho essencialmente operacional. As intervenções avaliadas foram escolhidas de modo a representar intervenções de naturezas essencialmente distintas entre si. As tipologias de intervenções contempladas são listadas a seguir:

- **Infraestrutural:** provisão de infraestrutura exclusiva para o TCO, para realização de manobras de ultrapassagem junto às paradas de ônibus – por meio da supressão de faixas originalmente dedicadas ao tráfego geral;
- **Operacional:** coleta desembarcada de tarifa e embarques/desembarques por todas as portas dos veículos simultaneamente – sem afetar diretamente a operação do tráfego geral;
- **Tecnológica:** substituição da frota de ônibus do TCO por veículos com motores elétricos (eletrificação da frota);
- **Política de preços:** cobrança por congestionamento e subsídios.

A partir dos exercícios práticos, a pesquisa desenvolverá seus dois objetivos específicos, nomeadamente: (i) a avaliação genérica do potencial de intervenções em corredores de transporte coletivo por ônibus como medida mitigatória de emissões veiculares e suas externalidades associadas, e; (ii) a exploração da sensibilidade dos resultados e conclusões produzidos pelo método de avaliação, no âmbito do problema desta Dissertação, à especificação do método de avaliação propriamente dita (i.e., sua estrutura e hipóteses e simplificações subjacentes).

4.1.3. Cenário de referência

Os exercícios analíticos são inspirados no contexto de um dos mais movimentados corredores de ônibus do município de São Paulo: o Corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro (daqui em diante, referido apenas por “Corredor Rebouças”), com destaque ao entorno da Parada Eldorado, junto à qual recentemente fora implementada uma faixa exclusiva adicional para serviços de transporte público (para manobras de ultrapassagem junto à parada) de aproximadamente 200 metros de extensão. Em particular, tal intervenção permitiu um aumento de capacidade de atendimento a ônibus e passageiros na Parada Eldorado, então um gargalo relevante para o Corredor (especialmente durante o período-pico vespertino), e implicou a supressão de uma faixa de circulação dedicada ao tráfego geral na Av. Eusébio Matoso (sentido Centro-Bairro). O corredor, o entorno da referida parada e a intervenção supracitada são ilustrados na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3.

Para fins de caracterização, parâmetros físicos e operacionais relativos ao corredor e à via na qual o corredor se insere foram aferidas com base em medições de fluxo de tráfego e velocidades apresentadas pela CET-SP (2018), em uma de suas Pesquisas de Monitoramento da Mobilidade, bem como em informações levantadas e sumarizadas por estudantes de engenharia em um trabalho de conclusão de curso (WAKAI e HORTELLANI, 2017) a respeito da operação em corredores de ônibus do Município de São Paulo. Ambas fontes são relativas ao ano de 2017, período no qual a parada Eldorado (Figura 4.2) operava sem faixa de ultrapassagem no sentido Bairro, sendo este o contexto considerado para caracterização do “cenário Base” do modelo analítico estruturado no desenvolvimento da presente pesquisa. Mais detalhes sobre a caracterização do cenário de referência e sua parametrização para representação por meio do modelo analítico são apresentados no Apêndice da Dissertação.

Figura 4.3: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (com faixa de ultrapassagem)
 Fonte: Google Earth

Para fins de uniformização da terminologia na descrição do modelo e dos exercícios desenvolvidos: por “berço”, entende-se cada posição individual para ônibus realizarem manobras de embarque e desembarque (podendo ser também referidos por “baías” ou “posições”); por “subparada”, entende-se um conjunto de berços adjacentes que atendem serviços de TCO em comum; por “parada”, entende-se ao equivalente a uma estação para sistemas de transporte coletivo, podendo ser compostos por uma ou mais subparadas.

4.2. Introdução ao Modelo Analítico

O modelo analítico parte de uma representação estilizada de um segmento homogêneo de 10 km (parâmetro L) de via arterial, inspirado no contexto descrito no item 4.1.3, ao longo do qual circulam dois modos de transporte (índice m): carros (índice car) e ônibus (índice bus).

As análises são desenvolvidas considerando dois Períodos de Análise (índice h), definidos por Pico (índice p , como em *peak*) e Fora-Pico (índice o , como em *off-peak*), visando representar os dois diferentes estados mais claramente manifestos ao longo de um dia de trabalho em áreas urbanas, considerando o “dia-de-trabalho” como correspondente ao período entre 06h e 20h30 de um dia útil típico. Todos os cálculos

são realizados por sentido, em base horária e parametrizados por quilômetro, exceto quando explicitamente indicado diferentemente¹⁶.

Para fins de simulação, cada um dos sentidos de circulação de cada período do dia-de-trabalho é associado a um dos Períodos de Análise. Por esta razão, admite-se que os sentidos não-dominantes de cada período de pico (i.e., Manhã e Tarde) operam em condições suficientemente similares às do Entrepico. A Tabela 4.1 sumariza a correspondência entre períodos do dia e períodos de simulação. Destaca-se que o referido por período “Pico” no modelo analítico corresponde aos sentidos dominantes (i.e., de maior carregamento) dos períodos Manhã e Tarde (ou “Pico Manhã” e “Pico Tarde”). Os sentidos não-dominantes dos períodos Manhã e Tarde, bem como ambos os sentidos do Entrepico, são representados no modelo analítico pelo Fora-Pico.

Tabela 4.1: Correlação entre períodos do dia e períodos de simulação

Período do dia	Abrangência ¹⁷	Sentidos de circulação	Período correspondente, no modelo analítico
Manhã	06h00 – 10h00	Dominante (Bairro-Centro / BC)	Pico
Manhã	06h00 – 10h00	Não-Dominante (Centro-Bairro / CB)	Fora-Pico
Entrepico	10h00 – 16h30	Ambos	Fora-Pico
Tarde	16h30 – 20h30	Não-Dominante (Bairro-Centro / BC)	Fora-Pico
Tarde	16h30 – 20h30	Dominante (Centro-Bairro / CB)	Pico

Fonte: Elaborado pelo autor

Admite-se que a demanda por viagens (variáveis “Y”) é homogênea em suas várias dimensões – i.e., é distribuída uniformemente ao longo do corredor; realiza viagens de extensão constante e igual a 10 km; e se comporta de forma homogênea, como um único segmento de demanda. Na modelagem da escolha dos usuários, os usuários têm a opção de viajar em um dos dois períodos (*p* e *o*) ou não realizar viagens (índice *nt*).

Nas equações a seguir, as variáveis “Y” indicam medidas de demanda com unidade de pessoas/10km/dia, segmentadas conforme a opção escolhida em relação

¹⁶ Posto que se convencionou expressar os cálculos para um quilômetro de via, a unidade “km” foi omitida do denominador e deve ser implicitamente entendida. Casos em que os cálculos não são apresentados por quilômetro de via são indicados especificamente.

¹⁷ Exceto quando explicitamente indicado diferentemente.

à realização ou não da viagem. A variável Y_{tot} (ou Y_{pot}) indica a demanda total (ou potencial), dada pela soma das parcelas. As variáveis “p” indicam a proporção da demanda total que escolheu cada uma das três alternativas disponíveis.

$$Y_{tot} = Y_{pot} = Y_{nt} + Y_p + Y_o = Y_{pot} * p_{nt} + Y_{pot} * p_p + Y_{pot} * p_o \quad (4.1)$$

$$Y_h = H_h * y_h = H_h * \sum_{m \in \{car; bus\}} y_{h,m} \quad (4.2)$$

As variáveis “y” foram criadas para melhor distinguir diferentes métricas de demanda e representam a demanda horária em cada alternativa, medida em viagens/h/10km. Finalmente, as variáveis “H” representam a duração de cada período, sendo medidas em horas. Em “Apêndice: Implementação do modelo analítico e cálculos complementares”, a forma como foram efetivamente tratadas tais relações é descrita, juntamente da apresentação dos cálculos correspondentes.

Destaca-se que a presença de diferentes segmentos de demanda é relevante para compreensão de aspectos distribucionais dentre tais segmentos nos impactos de intervenções sobre o sistema de transportes, tema não abrangido no presente estudo. Leitores interessados nesta extensão do presente problema são remetidos ao estudo de Basso e Silva (2014) e suas referências. Antecipa-se que, em um exercício específico realizado no referido estudo para explorar a influência de se representar a demanda desagregada em segmentos sobre os resultados agregados, os autores concluíram que representar a demanda de forma agregada (i.e., como um único segmento de demanda) não afetou a avaliação de impacto dos cenários (i.e., através das figuras de mérito como bem estar social e excedente do consumidor) de forma relevante.

O modelo busca reproduzir as interações entre operação do sistema de transportes, os usuários do sistema, o ambiente no qual se insere o sistema e os planejadores do sistema de transportes. Desta forma, o modelo analítico é construído a partir da representação de seis dimensões principais, ilustradas e enumeradas na Figura 4.4. Nesta, o termo “sistema” remete ao sistema de transportes – ou, mais especificamente, ao sistema de transportes tal qual representado no modelo analítico.

Figura 4.4: Principais dimensões do modelo e representação esquemática de seu encadeamento

Fonte: Elaborado pelo autor

No diagrama, os tópicos I e II, alinhados à esquerda (na vista do leitor), referem-se às interações que se dão dentro do sistema de transportes, em decorrência das características da oferta (infraestrutura e operação) e da demanda (atividades urbanas e escolhas dos usuários). Nos tópicos alinhados ao centro (III, IV e V) estão as dimensões associadas aos principais impactos socioeconômicos da operação de sistemas de transportes, considerando um horizonte no qual as decisões restrinjam-se ao planejamento das viagens a serem realizadas, por parte dos usuários, e a intervenções de rápida implementação, por parte dos planejadores do sistema – contendo, neste subconjunto, o planejamento da operação do TCO, a priorização de circulação ao TCO (sem acréscimo de infraestrutura viária) e a definição da política tarifária vigente no sistema.

A representação destas dimensões no modelo analítico é discutida na sequência do capítulo. As duas primeiras dimensões (I e II) são descritas no item 4.3, dentro do tópico definido como “Modelo de transportes”. A dimensão IV é tratada em item específico, denominada “Modelo de efeitos externos” (seção 4.4), por se tratar de um dos focos da presente pesquisa. Finalmente, no item 4.5, denominado “Modelo de planejamento de transportes”, é abordada a dimensão VI, que contempla a valoração dos impactos da operação dos sistemas de transporte, juntamente da representação das dimensões III e V – uma vez que estas geram insumos para a primeira.

Em um passo seguinte, se compõem, a partir dos Períodos de Análise (i.e., os períodos Pico e Fora-Pico), os resultados do Horizonte de Análise: o dia-de-trabalho (índice *wd*, como em *work-day*). O Horizonte de Análise, por sua vez, é levado em consideração pelos planejadores do sistema para a avaliação das intervenções e para a tomada de decisões visando a maximização do bem-estar social.

Destaca-se que nas seções 4.3 a 4.5 apresenta-se apenas a formulação do modelo, ao passo que no Apêndice descreve-se aspectos relativos à implementação do modelo propriamente dita, como os parâmetros utilizados e aspectos práticos relacionados à aplicação das equações. Exceções são feitas em que a descrição da formulação é naturalmente vinculada aos valores empregados, de forma que se optou por apresentar ambos os conteúdos de forma integrada.

4.3. Modelo de transportes

O modelo de transportes é estruturado a partir da análise de cada sentido de circulação independentemente. Conforme antecipado, o “Pico” é definido para representar o sentido mais carregado, ou dominante, dos períodos Pico Manhã (período das 6h às 10h) e Pico Tarde (período das 16h30 às 20h30). O “Fora-Pico”, por sua vez, é definido para representar o Entrepico (período das 10h às 16h30), em ambos seus sentidos, bem como os sentidos não-dominantes de cada período de pico. Desta forma, o Pico contribui para a composição do dia-de-trabalho com 8 horas¹⁸ ($H_p = 4+4$ horas) e o Fora-Pico, com 21 horas ($H_o = 6,5*2 + 4 + 4 = 21$ horas).

Os períodos foram definidos considerando o contexto de uma megalópole como São Paulo, nas quais a duração dos períodos de pico tende a ser mais ampla¹⁹. Para fins de cálculos que dependam de ambos os sentidos dentro de um período, como tempos de ciclo, a composição é feita explicitamente a partir dos resultados por sentido.

4.3.1. Modelo de tráfego

O modelo de tráfego (que essencialmente se trata de um modelo de oferta, em sentido mais amplo, dado o grau de simplificação da representação) é estruturado a partir da representação da capacidade de dois elementos do sistema: as vias e as paradas de ônibus. Os cálculos a seguir são parametrizados por quilômetro de via, para uniformização.

4.3.1.1. Operação viária

A operação nas vias é representada através de funções de fluxo-demora (*volume-delay functions*, em tradução livre), na formulação conhecida por BPR, nomeada segundo o *Bureau of Public Roads*, instituição estadunidense que a propôs em 1964. A formulação é apresentada a seguir, na equação (4.4).

¹⁸ A rigor, trata-se de uma unidade de medida de “horas*sentido”. Por simplicidade, manteve-se o emprego da unidade “horas”.

¹⁹ Em cidades de menor porte, por sua vez, é mais comum observar períodos de pico menos extensos, devendo-se ajustar os parâmetros do modelo conforme o contexto de aplicação.

$$X = \frac{Q}{C} \quad (4.3)$$

$$t = t_{ff} * [1 + \alpha * (X)^\beta] \quad (4.4)$$

nas quais,

Q : Demanda do segmento em análise [pcu/h];

C : Capacidade do segmento em análise [pcu/h];

X : Saturação do segmento em análise [adimensional];

t_{ff} : Taxa de viagem para demanda nula (ou fluxo livre) [h/km];

t_X : Taxa de viagem sob níveis de saturação equivalentes a X [h/km];

α, β : Parâmetros de calibração [adimensionais];

A demanda Q é calculada em veículos de passeio equivalentes (pcu), a partir da demanda de passageiros em cada modo de transportes e em cada período ($y_{(h,m)}$) e os correspondentes fluxos veiculares. Aos ônibus, deve ser aplicado um fator de equivalência de tráfego para obtenção do fluxo correspondente, medido em pcu. Szász (1995) sugere fatores de 2 e 2,5 para ônibus do tipo padron e do tipo articulado, respectivamente. Admite-se que a frota é composta igualmente por ônibus dos dois tipos citados, de modo que se emprega o fator médio entre os dois (i.e., 2,25 pcu/veículo) para os ônibus.

A capacidade na via homogênea (parâmetro C), por sua vez, é calculada como uma proporção do produto entre o número de faixas de tráfego (n_{faixas}) e o fluxo de saturação básico (parâmetro S). As referências e abordagens para definição dos parâmetros da função de fluxo-demora são apresentadas no Apêndice da dissertação.

4.3.1.2. Operação nos pontos de embarque e desembarque de ônibus

A operação nas paradas de ônibus, por sua vez, é representada a partir de duas componentes independentes entre si: (i) as operações de parada, incluindo embarque e desembarque, e (ii) atrasos decorrentes da formação de filas em pontos de parada. Antecipa-se que na notação empregada utilizou-se as variáveis “ τ ” para representar tempos por ponto de parada (medidas em unidades de tempo por parada) e as

variáveis “t” para representar sua medida análoga parametrizada por quilômetro de via (medidas em unidades de tempo por quilômetro).

4.3.1.2.1. Operações de parada para embarque e desembarque

O tempo total das operações de parada ($t_{boa/ali}$) por quilômetro são representadas considerando um tempo fixo ($\tau_{boa/ali,0}$), associado a manobras de desaceleração, aceleração e abertura de portas. Tal subcomponente pode ser referida por “tempo morto” (SZASZ, 1995), pois não é produtivo, do ponto de vista da operação de embarque e desembarque. Por não abranger embarques e desembarques, seu cálculo não varia conforme o fluxo de passageiros.

No que diz respeito à embarques e desembarques, inicialmente considera-se que embarques ocorram apenas por uma porta, situada na frente dos veículos, tal qual ocorre no cenário base da operação do corredor Rebouças. Para fins de uniformização da terminologia, destaca-se que se entende por “corredor” a infraestrutura relativa ao sistema de TCO especificamente e, por “segmento viário” (ou trecho viário), o conjunto de faixas de tráfego em ambos os sentidos de uma via (ou avenida), incluindo o próprio corredor. Finalmente, refere-se ao corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro por “corredor Rebouças”, por simplicidade.

Neste contexto, embarques e desembarques podem ocorrer simultaneamente. Considerando um equilíbrio entre volume de embarques e desembarques em cada parada, usualmente se admite o tempo dedicado a embarque como dominante para cálculo do tempo total gasto com embarques e desembarques (BASSO e SILVA, 2014; SZASZ, 1995). Tal aproximação é considerada especialmente aplicável em representações estilizadas, como as do presente estudo. O cálculo do tempo gasto por veículo e por quilômetro com embarques e desembarques se dá, portanto, por meio da equação (4.5):

$$t_{boa/ali,h} = \tau_{boa/ali,0} * p_{cor} + u\tau_{board} * \frac{y_{bus,h}}{L * f_{bus,h}} \quad (4.5)$$

Na equação acima, a primeira componente refere-se ao tempo morto, proporcional ao número de paradas por quilômetro (p_{cor}), ao passo que a segunda componente se refere ao tempo para embarques e desembarques. Nota-se que a segunda componente não depende diretamente do número de paradas por quilômetro, mas

sim da quantidade de passageiros a serem embarcados por quilômetro e por veículo, sendo calculada, portanto, proporcionalmente à razão entre demanda por quilômetro ($\frac{y_{bus,h}}{L}$), à frequência de serviços no período ($f_{bus,h}$) e ao tempo unitário por passageiro embarcando ($u\tau_{board}$). Os valores atribuídos aos parâmetros relevantes são descritos no Apêndice.

Uma das características comuns a corredores de BRT, visando trazer ganhos de produtividade à operação, consiste em nivelar o piso das paradas e dos ônibus, adotar veículos com portas mais amplas e permitir embarques e desembarques por todas as portas simultaneamente – seja ao realizar a coleta de tarifas de forma desembarcada ou em sistemas livres de catracas/cancelas, conhecidos por *honor-based*, ou “baseados em honestidade”, em tradução livre. Nestes contextos, os tempos unitários de embarque e desembarque reduzem-se, especialmente quando da adoção de veículos com mais de duas portas do mesmo lado, promovendo ganhos à operação como um todo.

Para representação de tais situações, utiliza-se uma variação da equação (4.5) que considera o fluxo total de passageiros, em vez de apenas o fluxo de passageiros embarcando, e recalcula o tempo unitário médio por manobra de embarque e desembarque ($u\tau_{boa/ali}$), conforme as equações (4.6) e (4.7). Tal cenário é introduzido especificamente no item 5.1.1.2.

$$u\tau_{boa/ali} = \frac{u\tau_{boa/ali,0}}{n_{doors}} \quad (4.6)$$

$$t_{boa/ali,h} = \tau_{boa/ali,0} * p_{cor} + u\tau_{boa/ali} * \frac{2 * y_{bus,h}}{L * f_{bus,h}} \quad (4.7)$$

4.3.1.2.2. Atrasos em pontos de parada

A formação de filas e o decorrente atraso em pontos de parada são calculados com base na saturação individual dos pontos de parada. A estimativa dos atrasos em pontos de parada é realizada a partir de dois passos: (i) cálculo da saturação das paradas e (ii) cálculo das filas associadas.

Para o cálculo da saturação das paradas, utiliza-se uma estimativa de capacidade das paradas baseadas nas equações apresentadas por Fernández et al. (2002). As

equações consistem em fórmulas empíricas estimadas a partir de dados obtidos por meio de simulações, permitindo que se capture fenômenos de difícil representação analítica, como bloqueios e demais interferências decorrentes da operação real – especialmente na presença de múltiplas baias (ou posições; ou berços) em uma mesma parada de ônibus.

A informação extraída do referido estudo é, justamente, a capacidade efetiva observada em condições práticas de operação, quando comparada a uma estimativa teórica. Sendo $\tau_{boa/ali}$ o tempo total gasto com manobras de parada para embarque e desembarque por parada, as capacidades teóricas (ou ideais) de um berço ($K_{berth,ideal}$) e de uma parada ($K_{stop,ideal}$) podem ser dadas por:

$$\tau_{boa/ali} = t_{boa/ali} * p_{cor} \quad (4.8)$$

$$K_{berth,ideal} = \frac{3600}{\tau_{boa/ali}} \quad (4.9)$$

$$K_{stop,ideal} = n_{berth} * K_{berth,ideal} \quad (4.10)$$

Entretanto, é notório que tais valores de capacidade são raramente observáveis – mesmo em configurações nas quais há apenas um berço por parada e as interferências negativas seriam menores. Em uma abordagem simplificada, a conhecida fórmula proposta pelo *Highway Capacity Manual* (TRB, 1997; 1994; 1985) propõe um fator redutor R para adequar valores teóricos de capacidade aos observados (ou observáveis) em campo, sugerindo valores da ordem de 83%. A partir das equações descritas por Fernández et al. (2002) para tempos de parada e capacidade efetiva, é também possível deduzir fatores redutores – para paradas contendo 1, 2 ou 3 berços.

A Tabela 4.2 apresenta valores de perda média de capacidade por berço, em relação à capacidade ideal, estimados para a faixa de valores de demanda entre 1 e 10 embarques por ônibus (mantendo-se taxas de desembarque constantes). Nota-se

que os valores estimados para a perda de capacidade de paradas com um berço resultam próximos aos valores propostos pelo TRB²⁰ (1997, 1994, 1985).

Tabela 4.2: Perdas de capacidade por configuração de parada de ônibus

Número de subparadas	Número de berços	Perda de capacidade por berço, em relação a $K_{berth,ideal}$ ($\%K_n$)
1	1	$\%K_1 = 18,7\%$
1	2	$\%K_2 = 42,0\%$
1	3	$\%K_3 = 52,1\%$

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir das equações apresentadas por Fernández et al. (2002)

No modelo analítico, considera-se que no cenário de referência as paradas do corredor possuem 2 berços por parada, de modo que a capacidade das paradas de ônibus (K_{stop}) pode dada pela equação (4.11). A equação (4.12) representa uma formulação alternativa, equivalente à equação anterior, que ora permite interpretar a ineficiência decorrente dos aspectos práticos da operação como um fator amplificador do tempo de parada teórico – neste caso, equivalente a 1,724, para uma parada com uma única subparada contendo dois berços.

$$K_{stop} = n_{berth} * (1 - \%K_2) * \frac{3600}{\tau_{boa/ali}} = \frac{4176}{\tau_{boa/ali}} \quad (4.11)$$

$$K_{stop} = \frac{n_{berth}}{\frac{1}{(1 - \%K_2)}} * \frac{3600}{\tau_{boa/ali}} = \frac{2 * 3600}{1,724 * \tau_{boa/ali}} \quad (4.12)$$

No âmbito dos exercícios desenvolvidos com base no modelo analítico, considera-se que não é possível aumentar a capacidade das paradas meramente aumentando-se o número de berços, restando apenas a possibilidade de operar com uma ou duas subparadas dotadas de dois berços, cada. Alternativamente, considera-se que a única alternativa para aumento da capacidade das paradas de ônibus é a implantação de

²⁰ Destaca-se que não são citadas versões seguintes do *Highway Capacity Manual* ou das versões do manual publicado posteriormente pelo TRB (2003) para endereçar sistemas de transporte público especificamente (i.e., *Transit Capacity and Quality of Service Manual*) por não serem apresentadas definições de capacidade consideradas compatíveis com os cálculos de saturação e atraso empregados no modelo analítico.

faixas de ultrapassagem junto às paradas, de modo a permitir a operação com duas subparadas independentes, dentro de cada parada de ônibus, e escalonamento dos serviços entre as subparadas – tal qual implementado na parada Eldorado do Corredor Rebouças, conforme descrito no item 4.1.3. Neste cenário, considera-se que as subparadas operam livremente de interferências, uma da outra, e que os serviços se dividem igualmente entre subparadas, de modo que a capacidade desta configuração, referida por “parada dupla” (K_{stop2}), passa a ser dada por:

$$K_{stop2} = 2 * K_{stop} = \frac{2 * 2 * 3600}{1,724 * \tau_{boa/ali}} \quad (4.13)$$

Deve-se ainda contemplar a possibilidade de interferência de semáforos sobre a operação de paradas de ônibus. Para tanto, na ausência de uma abordagem consolidada e validada para consideração de tal fenômeno, utiliza-se uma abordagem baseada no proposto por Szász (1995) no presente modelo analítico. A abordagem consiste, essencialmente, em subtrair do tempo disponível para manobras de embarque e desembarque – inicialmente representado pelo numeral “3600”, no numerador da equação (4.9), representando todos segundos contidos em uma hora – o tempo durante o qual o semáforo bloqueia a parada de ônibus. No caso de paradas de ônibus adjacentes a faixas de retenção de semáforos, considera-se que este tempo equivale ao tempo de vermelho incidente durante os ciclos semaforicos.

Por outro lado, há que se considerar que é possível realizar manobras de embarque e desembarque durante o bloqueio, de modo que se subtrai do tempo de vermelho uma parcela correspondente às manobras de parada que podem ocorrer durante o período. Para o cálculo da capacidade em paradas adjacentes a semáforos ($K_{stop,ns}$, com o índice *ns* como em *near signal*, ou próximo a semáforo, em tradução livre), considera-se o número de berços disponíveis e o tempo de parada amplificado, conforme introduzido na equação (4.12), resultando em:

$$K_{stop,ns} = K_{stop} * (1 - \%K_{block}) \quad (4.14)$$

$$\%K_{block} = \max \left\{ \frac{(\tau_{red} - \tau_{boa/ali} * 1,724)}{\tau_{signal}}; 0 \right\} \quad (4.15)$$

nas quais,

τ_{red} : Tempo de vermelho incidente durante o ciclo semafórico [segundos];

τ_{signal} : Tempo de ciclo semafórico [segundos];

$K_{stop,ns}$: Capacidade efetiva de uma parada simples situada junto à faixa de retenção de um semáforo [ônibus/h];

$\%K_{block}$: Perda de capacidade na parada de ônibus devido à presença de semáforo adjacente a jusante [adimensional];

Na equação (4.15), toma-se o máximo entre os valores para impedir que o fator $\%K_{block}$ aumente a capacidade das paradas em análise. Uma vez definidas as capacidades efetivas das paradas, dada a presença de semáforos adjacentes à jusante das mesmas, calcula-se a saturação (χ_{stop} ou $\chi_{stop,ns}$, a depender do tipo de parada), o atraso por parada (τ_{stop}) e o atraso por quilômetro decorrente segundo as fórmulas a seguir:

$$\chi_{stop,ns,h} = \frac{f_{bus,h}}{K_{stop,ns}} \quad (4.16)$$

$$\chi_{stop,h} = \frac{f_{bus,h}}{K_{stop}} \quad (4.17)$$

$$\tau_{stop,h} = \begin{cases} \frac{\chi_{stop,h}^2}{(1 - \chi_{stop,h})} * \frac{1}{f_{bus,h}}, & \text{se } stop \neq stop,ns \\ \frac{\chi_{stop,ns,h}^2}{(1 - \chi_{stop,ns,h})} * \frac{1}{f_{bus,h}}, & \text{se } stop = stop,ns \end{cases} \quad (4.18)$$

$$t_{stop,h} = \frac{\sum_p \tau_{stop,h}}{L} \quad (4.19)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (4.18) representa a estimativa de fila média decorrente da saturação das estações, em veículos – dada pelo caso específico da fórmula de Pollaczek-Khinchin para filas médias em regime estacionário sob tempos de atendimento com distribuição exponencial. A divisão deste termo pela frequência de ônibus passando pela estação converte a fila em uma estimativa de atraso (tempo em fila) por veículo. São apresentadas duas variações para cálculo do tempo em fila por parada, dependentes de se a parada é adjacente a um semáforo ($stop = stop,ns$) ou se é distante de modo a não sofrer interferências ($stop \neq$

stop, ns). Detalhes de como o atraso em paradas foi efetivamente contemplado no modelo são apresentados no Apêndice.

4.3.1.3. Tempos de viagem complementares

As parcelas apresentadas nos dois tópicos anteriores dizem respeito ao tempo de viagem dentro do veículo, na ótica dos usuários. No caso das viagens por ônibus, o modelo abrange ainda parcelas associadas ao tempo de espera pelo serviço ($t_{w,h}$) e ao tempo de caminhada de/para os pontos de parada (t_{ac}). As fórmulas para cálculo de ambas as componentes são apresentadas a seguir:

$$t_{w,h} = \frac{1}{2 * f_{bus,h}} \quad (4.20)$$

$$f_{bus,h} = \frac{y_{bus,h}}{k_{bus} * load_{h,avg}} \quad (4.21)$$

$$t_{ac} = \frac{1}{2 * p_{cor} * s_{ac}} \quad (4.22)$$

nas quais:

$f_{bus,h}$: Frequência dos serviços de ônibus no período h [ônibus/h];

k_{bus} : Capacidade média dos veículos empregados na operação dos serviços de ônibus [pax/ônibus];

$load_{h,avg}$: Ocupação relativa média de ônibus em serviço no período h [adimensional];

p_{cor} : Quantidade média de paradas de ônibus por quilômetro de corredor [# /km];

s_{ac} : Velocidade média de caminhada de/para paradas de ônibus [km/h];

4.3.2. Modelo comportamental dos usuários

O modelo comportamental dos usuários busca estimar, a partir de uma representação singela da estrutura de tomada de decisão dos mesmos, a parcela de usuários que utiliza cada uma das alternativas de viagem disponíveis – incluindo a alternativa de não realizar viagens (índice nt , como em *no-travel*), que a rigor se trata

da opção de não realizar viagens nos períodos representados pelo “Pico” e pelo “Fora-Pico”²¹.

4.3.2.1. Considerações sobre a demanda por viagens

Conforme antecipado no início desta seção, a demanda por viagens considerada no modelo é distribuída homogeneamente ao longo do segmento e no espaço. Seu comportamento também é homogêneo, em termos de suas preferências (i.e., todos os usuários comportam-se segundo o mesmo modelo de escolha e respectivas funções de utilidade), e todos realizam viagens de 10 km (i.e., mesma extensão do trecho de via considerado).

A extensão das viagens adotada é similar à média observada na RMSP (METRÔ-SP, 2017) e tem pouco efeito sobre a consistência dos resultados, uma vez que as observações utilizadas como referência dizem respeito ao fluxo de veículos e passageiros através de uma seção de via – sendo a densidade da demanda ao longo do segmento definida de modo a reproduzir tal carregamento. Com efeito, essa premissa apenas implica que a demanda total ao longo da extensão considerada corresponde ao carregamento em cada seção do segmento, convenientemente.

Adicionalmente, a demanda total (ou potencial), descrita na equação (4.23), é assumida como constante, ao passo que suas parcelas variam segundo os resultados produzidos pelo modelo comportamental descrito no início desta seção. Com efeito, apesar de a demanda potencial ser inelástica, a demanda por viagens e suas componentes (i.e., por período e por modo) é elástica às componentes do custo de viagem.

$$Y_{tot} = Y_{pot} = Y_{nt} + Y_p + Y_o = Y_{pot} * p_{nt} + Y_{pot} * p_p + Y_{pot} * p_o \quad (4.23)$$

²¹ A partir deste ponto, a descrição do significado de “não viajar” será omitida, sendo apenas utilizado o termo “não viajar” para representar esta alternativa – exceto quando explicitamente indicado diferentemente.

4.3.2.2. Arcabouço teórico subjacente

A estrutura adotada é a do clássico modelo Logit aninhado (ou hierárquico), introduzido por Ben-Akiva (1973, *apud* BASSO e SILVA, 2014), que permite estimar de forma probabilística as escolhas realizadas por agentes – por exemplo, na realização de seus deslocamentos. Modelos Logit se tratam de modelos nos quais a variável dependente é discreta e categórica, ao passo que a característica “aninhada” (ou “hierarquizada”) se deve ao fato de que a escolha é decomposta em mais de uma decisão sequencial.

O modelo Logit é formulado com base na Teoria da Utilidade Aleatória (*Random Utility Theory*, em tradução livre), cuja premissa básica é que os usuários são agentes racionais maximizando sua utilidade em relação a suas escolhas, dado um conjunto específico de alternativas mutuamente excludentes – sendo parte desta utilidade observável e mensurável por um agente externo, e seu complemento permanecendo inobservável e, portanto, representada como variável aleatória (CASCETTA, 2007).

Leitores interessados em uma apresentação abrangente e rigorosa dos modelos de escolha discreta baseados na Teoria da Utilidade Aleatória (dentre os quais, o modelo Logit aninhado) são remetidos a livros-texto clássicos de análise e modelagem de sistemas de transporte, como o de Cascetta (2007), ao passo que no presente texto são descritas apenas as principais características destes modelos, de modo a permitir a compreensão da relação entre aspectos conceituais subjacentes ao modelo e sua formulação matemática.

No enfoque da Teoria da Utilidade Aleatória, a utilidade (variável U) percebida pelos usuários é decomposta em uma componente observável e sistemática (variável V) e uma componente não-observável aleatória (variável ε), conforme apresentado na equação (4.24). Devido à presença de uma componente aleatória, o fato de uma dada alternativa apresentar maior utilidade observável que as demais não significa que a mesma será escolhida por todos os agentes. A escolha dependerá do comportamento do termo não-observável, que se assume distribuído independentemente e aleatoriamente dentre a população e com valor médio nulo.

Com efeito, o texto do parágrafo anterior implica as seguintes propriedades – considerando, para fins de contexto, as probabilidades de escolha (p_i e p_j) entre uma alternativa i e uma alternativa j :

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad (4.24)$$

$$E[\varepsilon_i] = 0 \quad (4.25)$$

$$E[U_i] = E[V_i] = V_i \quad (4.26)$$

$$Var[U_i] = Var[\varepsilon_i] = \sigma^2 \quad (4.27)$$

$$Cov[\varepsilon_i, \varepsilon_j] = 0$$

$$Var[V_i] = 0 \quad (4.28)$$

$$p_i = Pr[V_i - V_j > \varepsilon_j - \varepsilon_i] = (1 - p_j) \quad (4.29)$$

A equação (4.29) resume o caráter probabilístico na representação do processo da escolha, na qual a diferença entre as parcelas mensuráveis da utilidade é insuficiente para a determinação das escolhas. Uma vez que a variância da parcela observável da utilidade (V_i) é admitida como nula, o caráter probabilístico do modelo reside fundamentalmente na variância da parcela aleatória das utilidades.

Outras características que já podem ser aferidas a partir das equações acima são que (i) as escolhas dependem das diferenças absolutas entre parcelas observáveis (referidas por “utilidades relativas”), não dependendo de seus valores independentemente – característica referida por “invariância” ou “aditividade” (CASCETTA, 2007), que é consistente com a concepção de que as utilidades são atributos essencialmente ordinais, e não cardinais; e que (ii) quanto maior a variância das parcelas aleatórias, menos influente torna-se a diferença absoluta das parcelas sistemáticas sobre o resultado do processo. Uma implicação da propriedade (i) é que valores absolutos das utilidades de cada alternativa não são determináveis na calibração de modelos Logit – são determinadas as utilidades relativas, apenas.

A partir da hipótese de que a componente aleatória da utilidade se comporta segundo uma distribuição Gumbel, são válidas as relações apresentadas a seguir (CASCETTA, 2007), considerando a existência de n alternativas. Esta hipótese é uma das premissas fundamentais dos modelos Logit, apesar de não ser crítica para a modelagem do processo de escolha. Admitir distribuições alternativas para o termo de erro – como distribuições normais, no caso dos modelos Probit – não altera o

enfoque para modelagem do processo de escolha, porém é inconveniente do ponto de vista da tratabilidade analítica do problema.

$$Var[U_i] = Var[\varepsilon_i] = \sigma^2 = \frac{\pi^2}{6\lambda^2} \quad (4.30)$$

$$p_i = \frac{\exp(\lambda * V_i)}{\sum_n \exp(\lambda * V_n)} \quad (4.31)$$

$$\frac{p_i}{p_j} = \frac{\exp(\lambda * V_i)}{\exp(\lambda * V_j)} \quad (4.32)$$

$$U_M = \max_n(U_i) \Rightarrow E[U_M] = \frac{1}{\lambda} * \ln \sum_n \exp(\lambda * V_n) \quad (4.33)$$

A equação (4.30) parametriza a variância do termo aleatório por meio de um parâmetro de escala λ , inversamente proporcional à variância. Este parâmetro é o mesmo que consta nas equações seguintes e é distinto por nível de escolha, em modelos Logit hierárquicos.

A equação (4.31) indica a fórmula para cálculo da probabilidade de escolha de uma alternativa i , em função das utilidades sistemáticas de cada uma das n alternativas disponíveis no conjunto de escolhas. A hipótese de termos aleatórios distribuídos segundo distribuições Gumbel permite calcular tais probabilidades a partir de expressões de forma fechada (*closed-form expressions*, em tradução livre). Como implicação direta de (4.31), a equação (4.32) indica que a razão entre as probabilidades de escolha de duas alternativas depende apenas da utilidade sistemática de ambas, independentemente das utilidades das demais alternativas, caso existam.

Finalmente, a equação (4.33) apresenta uma expressão de forma fechada para o cálculo da utilidade máxima esperada para um dado conjunto de alternativas. A expressão é também conhecida por *logsum*, em alusão a sua formulação (i.e., por envolver o logaritmo de uma somatória). Tal expressão é relevante para modelos Logit hierárquicos uma vez que permite o cálculo da utilidade esperada para cada um dos ninhos (na modelagem da escolha do nível superior), sem que se dependa de qual alternativa será selecionada no respectivo ninho (na modelagem da escolha do nível inferior). Como propriedades, nota-se que a utilidade máxima esperada é maior que

todas as utilidades individuais, bem como que a adição de uma nova alternativa sempre fará com que a utilidade máxima esperada aumente, independente de quanto inferior sua utilidade possa ser em relação às demais alternativas disponíveis.

A luz das relações apresentadas, destaca-se que a hierarquização do processo de escolha visa contribuir para a validade da hipótese de que as componentes aleatórias sejam *i.i.d.* (independentes e identicamente distribuídas) entre alternativas. Em casos em que as variáveis não mensuradas apresentem graus de correlação pronunciadamente distintos entre pares de alternativas, convém arranjá-las em ninhos e hierarquizar o processo de escolha com o objetivo de que a hipótese seja válida dentro de cada nível e de cada ninho. Uma ilustração deste arranjo, considerando o modelo analítico do presente estudo, é apresentada no item seguinte.

4.3.2.3. Nível inferior – Escolha modal

A Figura 4.5 ilustra a estrutura do processo decisório sendo representado no presente estudo, ilustrando também a caracterização dos ninhos ou, alternativamente, a hierarquização do processo de escolha (em níveis/etapas).

Figura 4.5: Esquema representativo do processo decisório dos usuários

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado na representação de árvore de decisão de Basso e Silva (2014)

O nível inferior da escolha representa a decisão de qual modo utilizar em sua viagem, dentre os disponíveis: carro (índice *car*) e ônibus (índice *bus*). Para representação das variáveis do nível inferior é utilizado o índice 2, ao passo que para a representação de um período genérico é utilizado o índice *h*, e de um modo genérico, o índice *m*.

As utilidades sistemáticas de cada alternativa e as probabilidades de escolha associadas são dadas pelas fórmulas²² a seguir. O significado das variáveis e interpretações das equações são apresentados em seguida.

$$V_{m,h} = V_{m|h} \sim -CGV_{m,h} = \hat{\beta}_{m,h} * \hat{X}_{m,h} \quad (4.34)$$

²² Na equação (4.34) são apresentadas duas notações alternativas para os índices, na interação entre modos e períodos, que são empregadas de forma intercambiável no texto.

$$p_{car,h} = \frac{\exp(\lambda_2 * (V_{car,h}))}{\sum_m \exp(\lambda_2 * V_{m,h})} = (1 - p_{bus,h}) \quad (4.35)$$

nas quais:

$V_{m,h}$: Utilidade sistemática de viajar utilizando o modo m no período h [R\$];

$V_{m|h}$: Utilidade sistemática de viajar utilizando o modo m , dado que se tenha escolhido viajar no período h [R\$]²³;

$CGV_{m,h}$: Custo generalizado de viagem associado ao modo m no período h [R\$];

$\tilde{X}_{m,h}$: Vetor de variáveis explicativas da função de utilidade de viajar utilizando o modo m no período h [representação genérica];

$\tilde{\beta}_{m,h}$: Vetor de parâmetros associados a cada variável explicativa da função de utilidade de viajar utilizando o modo m no período h [representação genérica];

λ_2 : Parâmetro de escala relativo ao nível inferior da árvore de decisão [util/R\$];

As variáveis $V_{car,h}$ e $V_{bus,h}$ (variações de $V_{m,h}$) representam as parcelas sistemáticas da utilidade de cada modo no respectivo período, cujo cálculo abrange o equivalente ao oposto do custo generalizado (cf. eq. (4.34)), em valores monetários, para uma viagem de extensão L nos modos. Como consequência, um acréscimo no custo generalizado de viagem em um dado modo e em um dado período representa um decréscimo na utilidade sistemática de viajar nesta alternativa. Adicionalmente, uma vez que as utilidades passam a ter dimensão definida (sendo medidas em Reais), suas parcelas aleatórias também passam a ter unidade e isto afeta a valoração do parâmetro de escala λ_2 . No que diz respeito aos vetores $\tilde{\beta}_{m,h}$ e $\tilde{X}_{m,h}$, sua composição é explicitada nas equações (4.36) e (4.37) e comentada em seguida:

$$V_{car,h} = -L \cdot \left[SVT_{car,h} * t_{car,h} + \frac{(T_{car,h} + oc_{car})}{a_{car,h}} \right] - \frac{est_{car}}{a_{car,h}} \quad (4.36)$$

$$V_{bus,h} = -SVT_{bus,h} \cdot [t_{bus,h} * L + \gamma_w * t_{w,h} + \gamma_a * t_{ac}] - T_{bus,h} + \theta_{bus,h} \quad (4.37)$$

²³ As variáveis $V_{m,h}$ e $V_{m|h}$ são ambas introduzidas para destacar que os índices “m,h” e “m|h” são utilizados de forma intercambiável.

nas quais:

$V_{m,h}$: Utilidade sistemática de viajar utilizando o modo m no período h [R\$];

L : Extensão da viagem dentro do veículo [km];

$SVT_{m,h}$: Valor subjetivo do tempo para usuários do modo m no período h [R\$/h];

$t_{m,h}$: Taxa de viagem dentro do veículo para usuários do modo m no período h – definida como o inverso da velocidade [h/km];

$T_{m,h}$: Tarifa de uso incidente sobre usuários do modo m no período h – correspondente à cobrança pelo congestionamento, no caso de usuários de automóveis, e à tarifa pública de ônibus, no caso de usuários de ônibus [R\$];

oc_{car} : Custo médio de utilização de automóveis [R\$/VKM];

$a_{car,h}$: Número de ocupantes médio em automóveis no período h [pax/veículo];

est_{car} : Custo médio de estacionamentos para automóveis [R\$];

γ_w : Fator de equivalência do tempo gasto esperando por serviços de ônibus, em relação ao tempo de viagem por ônibus dentro do veículo [adimensional];

γ_a : Fator de equivalência do tempo gasto caminhando de/para paradas de ônibus, em relação ao tempo de viagem por ônibus dentro do veículo [adimensional];

$t_{w,h}$: Tempo médio gasto esperando por serviços de ônibus no período h [h];

t_{ac} : Tempo médio gasto caminhando de/para paradas de ônibus [h];

$\theta_{bus,h}$: Constante específica do modo ônibus no período h [R\$];

Nas equações acima, as variáveis relativas a tempos de viagem são obtidas a partir do Modelo de Tráfego, descrito na seção anterior, ao passo que as variáveis monetárias são dependentes do contexto e de políticas públicas – sendo parte delas (como tarifas de ônibus ($T_{bus,h}$) e pedágios para automóveis ($T_{car,h}$)) objeto de manipulação durante os experimentos desenvolvidos na presente pesquisa, como resultados do Modelo de Planejamento de Transportes e do processo de cálculo apresentado na seção 4.5.5.

Em relação aos parâmetros das funções (contidos nos vetores de $\tilde{\beta}_{m,h}$, como $SVT_{m,h}$) e variáveis não associadas ao modelo de tráfego (e.g., oc_{car} , $a_{car,h}$), são admitidos valores a partir de referências baseadas em literatura e em medições de campo disponíveis, conforme descrito no Apêndice. No que diz respeito

especificamente aos parâmetros θ e λ , definidos em função das características do modelo Logit, os mesmos são obtidos a partir das propriedades apresentadas no item anterior, conforme descrito a seguir.

Primeiramente, estima-se o parâmetro de escala. Em modelos de escolha discreta nos quais a utilidade é expressa sem dimensão definida – ou em *utils* (unidade hipotética de medida de utilidade, em tradução livre) –, este parâmetro é indeterminado dentro de um mesmo nível (ou, alternativamente, é equivalente à unidade). Entretanto, dado que a utilidade definida é expressa em valores monetários (i.e., em Reais), definir este parâmetro torna-se necessário.

Conforme elucidado por Cascetta (2007), a elasticidade da probabilidade de escolha de uma alternativa m com relação a um atributo k pertencente a sua própria função de utilidade é dada pela equação (4.38). É possível obter o parâmetro λ_2 introduzindo uma informação ou condição adicional, como a elasticidade de uma das alternativas em relação a uma das variáveis presentes nas funções utilidade. O processo efetivamente empregado para sua obtenção é descrito na seção Apêndice: C).

$$\eta_k^{p_{m|h}} = \eta_k^{Y_{m|h}} = (1 - p_{m|h}) * \beta_{k,m|h} * X_{k,m|h} * \lambda_2 \quad (4.38)$$

sendo,

$\eta_k^{Y_{m|h}}$: Elasticidade da demanda pela escolha do modo m no período h em relação ao valor da variável k [adimensional];

$\beta_{k,m|h}$: Coeficiente da variável k na função de utilidade da alternativa m (dada a escolha prévia do ninho h);

$X_{k,m|h}$: Valor da variável k na função de utilidade da alternativa m (dada a escolha prévia do ninho h);

As constantes $\theta_{bus,h}$, por sua vez, representam a média da diferença entre as parcelas aleatórias entre as duas alternativas (modos) disponíveis, definida por período de forma independente. Seu papel é capturar as preferências médias dos usuários associadas às variáveis não contempladas no cálculo das parcelas sistemáticas das utilidades. Tal parâmetro não é observável diretamente, mas pode ser estimado a partir das escolhas observadas na situação-base, dados os valores

das demais componentes das utilidades sistemáticas das alternativas. Matematicamente, seu cálculo é baseado na equação (4.31) e, após transformações algébricas, pode ser dado por:

$$\theta_{bus,h} = - \left\{ \tilde{V}_{0,bus,h} - V_{0,car,h} + \frac{1}{\lambda_2} * \ln \left[\left(\frac{1}{p_{0,bus,h}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (4.39)$$

na qual o índice “0” remete aos valores observados no cenário de referência, e:

$\tilde{V}_{0,bus,h}$: aproximação da utilidade sistemática do modo ônibus no período h , no cenário de referência, considerando $\theta_{bus,h} = 0$.

Destaca-se que em Apêndice: C) e Apêndice: E) é descrita a abordagem para a efetiva obtenção de tais valores.

4.3.2.4. Nível superior – Planejamento da viagem

O nível superior da escolha representa a decisão de viajar no Pico (índice p), viajar no Fora-Pico (índice o) ou não viajar (índice nt) em nenhum dos dois períodos. Para representação das variáveis do nível superior é utilizado o índice 1.

As utilidades sistemáticas de cada alternativa são dadas pelas equações (4.40) a (4.42), derivadas a partir da equação (4.33), ao passo que as probabilidades de escolha associadas são dadas pelas equações (4.43) a (4.45), apresentadas a seguir:

$$V_p = \theta_p + \frac{1}{\lambda_2} * \ln \sum_m \exp(\lambda_2 * V_{m,p}) \quad (4.40)$$

$$V_o = \theta_o + \frac{1}{\lambda_2} * \ln \sum_m \exp(\lambda_2 * V_{m,o}) \quad (4.41)$$

$$V_{nt} = \theta_{nt} = 0 \quad (4.42)$$

$$p_p = \frac{\exp(\lambda_1 * V_p)}{\sum_t \exp(\lambda_1 * V_t)} \quad (4.43)$$

$$p_o = \frac{\exp(\lambda_1 * V_o)}{\sum_t \exp(\lambda_1 * V_t)} \quad (4.44)$$

$$p_{nt} = \frac{\exp(\lambda_1 * V_{nt})}{\sum_t \exp(\lambda_1 * V_t)} = \frac{\exp(0)}{\sum_t \exp(\lambda_1 * V_t)} \quad (4.45)$$

Na equação (4.42), é indicado que a alternativa de não viajar foi escolhida como a alternativa de referência para cálculo das constantes específicas das alternativas (θ_p e θ_o , admitindo-se θ_{nt} igual à zero). Conceitualmente, esta premissa permite que as constantes específicas de se viajar em cada um dos períodos representados sejam interpretadas como o benefício adicional percebido de se viajar em cada um deles, em relação à alternativa de não viajar. Como o custo generalizado de viagem é naturalmente nulo na alternativa de não viajar, esta premissa implica que a parcela sistemática da utilidade associada à essa alternativa é nula.

A definição do parâmetro de escala relativo ao nível superior da escolha (λ_1) pode se dar a partir da introdução de uma nova informação associada às elasticidades no cenário de referência ou a partir da definição da razão entre os parâmetros de escala dos níveis inferior e superior.

Considerando que os parâmetros de escala são inversamente proporcionais à variância do termo aleatório do respectivo nível (cf. eq. (4.30)), bem como considerando que a variância dos níveis superiores, em modelos hierárquicos, é não-inferior a de seus ninhos subordinados (cf. CASCETTA, 2007), tem-se que:

$$\rho_\lambda = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \leq 1 \quad (4.46)$$

No presente caso, admite-se a mesma hipótese estabelecida por Basso e Silva (2014) de que esta relação assume o valor de 0,25, uma vez que se trata de um modelo de estrutura idêntica, implicando:

$$\lambda_1 = \lambda_2 * 0,25 \quad (4.47)$$

Finalmente, o cálculo das constantes específicas de cada período se dá de forma análoga ao cálculo de $\theta_{b,h}$, conforme a equação (4.39), sendo descrito nas equações (4.48) e (4.49). Nestas, o índice “0” remete, novamente, aos valores observados no cenário de referência e as aproximações das parcelas sistemáticas da utilidade em cada período ($\tilde{V}_{0,p}$ e $\tilde{V}_{0,o}$) são calculados conforme as equações (4.40) e (4.41),

adotando-se θ_p e θ_o nulos. A aplicação deste processo de cálculo é ilustrada na seção Apêndice: C).

$$\theta_p = \ln\left(\frac{p_{0,p}}{p_{0,nt}}\right) * \frac{1}{\lambda_1} - \tilde{V}_{0,p} \quad (4.48)$$

$$\theta_o = \ln\left(\frac{p_{0,o}}{p_{0,nt}}\right) * \frac{1}{\lambda_1} - \tilde{V}_{0,o} \quad (4.49)$$

4.4. Modelo de efeitos externos

O modelo para representação dos principais efeitos externos associados a emissões veiculares de poluentes (EVP) na operação do sistema de transportes – i.e., os impactos descritos na seção 2.3 – é composto por três submodelos: o submodelo responsável por estimar as emissões veiculares de poluentes decorrentes da operação do sistema e os dois submodelos responsáveis por estimar os impactos destas emissões nas escalas local e global, respectivamente, conforme discriminado na seção 3.4. Cada componente é descrita em itens específicos na sequência desta seção.

4.4.1. Emissões veiculares instantâneas de poluentes

Conforme discutido na seção 3.2, os modelos de EVP devem oferecer sensibilidade adequada a variáveis de decisão relevantes, bem como ser compatíveis com a resolução (i.e., grau de desagregação) dos resultados produzidos pelo modelo de tráfego.

Dado que o modelo explorado na dissertação se trata de um modelo analítico estático, os resultados produzidos referem-se a condições médias de tráfego (e.g., fluxos médios por hora, velocidades médias por hora), não fornecendo métricas mais intimamente correlacionadas com EVP (e.g., acelerações instantâneas, velocidades instantâneas).

Desta forma, optou-se por considerar como referência os modelos mesoscópicos/baseados na condição de tráfego, conforme a taxonomia apresentada na seção 3.2. Em outras palavras, trata-se dos modelos baseados em ciclos de condução. Tais modelos permitem correlacionar condições de tráfego sob diferentes regimes de operação com emissões unitárias (em g/VKM), utilizando-se indicadores

operacionais associados aos ciclos de condução em termos médios (como velocidades médias). O método para cálculo das emissões unitárias em função das velocidades médias calculadas por meio do modelo analítico é descrito em detalhes na seção Apêndice: F).

Uma vez estabelecidas as funções de emissões unitárias, obtém-se as emissões totais por meio do produto entre as emissões unitárias do poluente de interesse, para a categoria veicular de interesse, e a distância percorrida pelos veículos da respectiva categoria no período de análise. A equação (4.50) descreve este cálculo, em termos de emissões por quilômetro e por hora. Os termos $ue_{m,pol,h}(t_{m,h})$ indicam que as emissões são calculadas em função das velocidades médias.

$$e_{pol,h} = \frac{y_{car,h}}{a_{car,h}} * ue_{car,pol,h}(t_{car,h}) + f_{bus,h} * ue_{bus,pol,h}(t_{bus,h}) \quad (4.50)$$

Por fim, deve-se ter em vista que o Material Particulado é emitido não só na forma de emissões pelos escapamentos dos veículos, mas também via desgaste de peças (e.g., freios) e do pavimento, conforme considerado pela EEA (2019). Para contemplar tal fenômeno, é empregado o fator φ_{PM} no cálculo das emissões totais de Material Particulado, representando a proporção das emissões totais ($e_{PM_{2.5},h}^+$) que é emitida pelo escapamento. O fator é empregado conforme apresentado na equação (4.51):

$$e_{PM_{2.5},h}^+ = \frac{e_{PM_{2.5},h}}{\varphi_{PM}} \quad (4.51)$$

Na sequência do texto, a notação $e_{PM_{2.5},h}$ é empregada para representar as emissões totais de material particulado, em substituição à notação $e_{PM_{2.5},h}^+$, visando simplificar a leitura. O termo “totais” em “emissões totais” passa, também, a ser omitido.

4.4.2. Efeitos globais

Para cômputo dos impactos das EVP em escala global, utiliza-se a abordagem descrita no item 3.3.1. De posse das estimativas de emissões totais, o método é bastante objetivo e consiste em multiplicar as emissões de cada poluente pelo coeficiente de GWP (*Global Warming Potential*) do respectivo poluente, resumidos na

tabela Tabela 3.3, de modo a obter o montante total de emissões em termos de CO₂eq ($e_{CO_{2eq},h}$), conforme a equação a seguir. Reitera-se que as equações do modelo são formuladas em base horária e parametrizadas por quilômetro – exceto quando explicitamente indicado diferentemente –, de modo que a unidade do termo do lado esquerdo da equação é $\left[\frac{g_{CO_{2eq}}}{h}\right]$ ²⁴.

$$e_{CO_{2eq},h} = e_{CO_2,h} + \sum GWP_{pol} * e_{pol,h} \quad (4.52)$$

4.4.3. Efeitos locais

Conforme elucidado no item 3.3.2, a estimativa dos impactos das EVP em escala local contempla uma composição de fenômenos que ocorrem após as emissões, abrangendo desde a dispersão dos poluentes emitidos até os decorrentes efeitos sobre a saúde.

A representação de cada um destes fenômenos no âmbito do modelo analítico é descrita na sequência deste item. Com base nas recomendações identificadas na revisão bibliográfica (item 3.3.2), a avaliação dos impactos das EVP em escala local baseia-se na avaliação dos impactos sobre mortalidade associados a emissões de $PM_{2.5}$.

4.4.3.1. Dispersões e concentrações

Os fenômenos de dispersão e concentração após emissões de $PM_{2.5}$ são avaliados por meio das equações (3.5) a (3.7), reproduzidas a seguir e ilustradas na Figura 4.6, que permitem estimar as concentrações incrementais resultantes (em $\frac{\mu g}{m^3}$), no entorno de uma dada via, a partir das emissões incrementais geradas pelo tráfego de passagem (em $\frac{g}{km*h}$). Nas equações, a variável *TC* indica a contribuição do tráfego (*traffic contribution*, em tradução livre) para as concentrações de poluentes e a variável *z* indica a distância transversal, em relação ao eixo da via.

²⁴Posto que se convencionou expressar os cálculos para um quilômetro de via, a unidade “km” foi omitida do denominador e deve ser implicitamente entendida. Casos em que os cálculos não são apresentados por quilômetro de via são indicados especificamente.

$$[2m < z \leq 5m]: \quad TC = 0,063541 \quad (4.53)$$

$$[5m < z \leq 168m]: \quad TC = 0,17887 + 0,00024 * z - \left(0,295776/z\right) + \left(0,2596/z^2\right) - 0,0421 * \ln(z) \quad (4.54)$$

$$[168m < z \leq 232m]: \quad TC = [1,7675 - (0,0276173 * (z - 168))] * 10^{-3} \quad (4.55)$$

Figura 4.6: Contribuição do tráfego para a concentração de poluentes a diferentes distâncias do eixo da via

Fonte: Reproduzido de HIGHWAYS AGENCY, 2007

O dado de entrada fundamental consiste das emissões totais de $PM_{2.5}$ por quilômetro de via e por hora de operação. Nota-se que, por se tratar de uma análise incremental, não é necessário que se defina a concentração de fundo. Para fins de avaliação, considera-se que a concentração incremental se acumula ao longo do dia-de-trabalho, na composição da concentração incremental diária, conforme descrito nos itens a seguir.

4.4.3.2. Exposição

Uma vez estabelecida a concentração incremental, o cômputo da exposição é fundamentado em duas premissas.

Primeiramente, conforme sugerido pelo COMEAP (2010), a concentração incremental a ser considerada é calculada como sendo a concentração incremental média ponderada pela população exposta. Com efeito, isto é dado pela integral do produto entre a contribuição incremental do tráfego (variável TC, como em *traffic contribution*, cf. eq. (4.53) a (4.55)) e a densidade populacional, em função da distância transversal ao eixo da via – no espectro de distâncias nas quais TC é definida e não-nula (i.e., entre 2 m e 232 m). Este cálculo é expresso na equação (4.56), para cada período h , na qual a variável z indica a distância transversal em relação ao eixo da via, em metros.

$$\Delta[PM_{2.5}]_{avg,h} = e_{PM_{2.5},h}^+ * \frac{\int_{z=2}^{232} TC(z) * pop_h(z) * dz}{\int_{z=2}^{232} pop_h(z) * dz} \quad (4.56)$$

Novamente, os cálculos acima apresentam-se na base horária e referem-se a um quilômetro de via. A abordagem para cálculo dos termos da equação é detalhada no Apêndice. Com efeito, os resultados da equação (4.56) são dados em $\left[\frac{\left(\frac{\mu g}{m^3} \right)}{h} \right]$, devendo ser multiplicados pelas horas de operação para que se obtenha a concentração incremental diária efetiva, conforme ilustrado na equação (4.57).

$$\Delta[PM_{2.5}]_{avg,wd} = \sum_h (H_h * \Delta[PM_{2.5}]_{avg,h}) \quad (4.57)$$

4.4.3.3. Efeitos sobre a saúde

Os modelos de efeitos finais sobre a saúde considerados baseiam-se em curvas epidemiológicas referentes à mortalidade associada às concentrações de material particulado ($PM_{2.5}$) no ambiente, conforme destacado no item 3.3.2. Em linha com os princípios sumarizados no referido item, a avaliação de efeitos sobre a saúde resume-se a efeitos associados à mortalidade, por serem estes amplamente mais relevantes economicamente que os efeitos associados à morbilidade.

A formulação efetivamente utilizada é descrita pela equação (4.58), na qual a variável M refere-se à quantidade de eventos associados à mortalidade (i.e., mortes de indivíduos). Posto que o método é elaborado para análises em base anual, os resultados são divididos pelo número de dias no ano, 365, para tornarem-se consistentes com os valores de concentração incremental diária passíveis de obtenção através da abordagem descrita na passagem anterior. Uma interpretação alternativa à forma de cálculo descrita é a de que, caso os resultados para o dia em análise se repitam ao longo dos 365 dias do ano, a concentração incremental diária estimada corresponderia à concentração incremental diária média anual, e os resultados obtidos corresponderiam exatamente aos da equação original – i.e., sem a divisão do resultado por 365.

$$\Delta M = \frac{M_0}{365} * (e^{0,07696 * \Delta[PM_{2.5}]_{avg,wd}} - 1) \quad (4.58)$$

$$M_0 = \%M_{0,MSP} * \overline{pop} = 0,569\% * \overline{pop} \quad (4.59)$$

$$\overline{pop} = \frac{\sum_h \left[H_h * \int_{z=2}^{232} pop_h(z) * dz \right]}{\sum_h H_h} \quad (4.60)$$

sendo,

M_0 : Eventos (mortes) na linha de base [eventos/ano/km – isto é, dentre a população que ocupa um quilômetro de via];

ΔM : Variação na quantidade de eventos [eventos/ano/km – analogamente à unidade de M_0];

$\overline{pop}$: População exposta média ao longo do dia-de-trabalho [habitantes/km];

$\%M_{0,MSP}$: Taxa de mortalidade (média) na linha de base incidente sobre a população do Município de São Paulo [eventos/habitantes];

A equação (4.60) representa o cálculo da população média exposta ($\overline{pop}$), calculada segundo a média horária da população exposta ao longo do dia-de-trabalho – cujo cálculo é detalhado no Apêndice. A equação (4.59), por sua vez, calcula o resultado referente à linha de base (M_0) por meio do produto entre a população média exposta e a taxa de mortalidade média ($\%M_{0,MSP}$) reportada por Abe e Miraglia (2016) para a população do Município de São Paulo (MSP). Finalmente, a equação (4.58)

refere-se à função de estímulo-resposta identificada e descrita no item 3.3.2 – sendo o estímulo, o aumento (ou redução) das concentrações de $PM_{2.5}$ no ambiente, e a resposta, o aumento (ou redução) nas mortes dentre a população exposta.

Há, ainda, uma dimensão dos efeitos sobre a saúde a contemplar. Conforme discutido no item 3.4.2, não é adequado falar em mortes evitadas com reduções de EVP, mas, sim, em mortes postergadas – ou em mortes prematuras, em caso de acréscimos de EVP. Desta forma, o impacto correspondente sobre a saúde torna-se melhor expresso em termos de anos de vida perdidos ou ganhos, em vez de em termos de mortes *per se*. Com base nos valores sumarizados na Tabela 3.6, o equivalente das mortes (ΔM) expresso em termos de anos de vida perdidos (YLL) pode ser aproximado por:

$$YLL = 12,3 * \Delta M \quad (4.61)$$

4.5. Modelo de planejamento de transportes

O modelo de planejamento de transportes consiste em representar a valoração dos impactos econômicos estimados, segundo as três dimensões ilustradas no eixo vertical central do fluxograma da Figura 4.7, e o processo decisório para maximização do benefício social. Como apenas a dimensão IV é abordada em item específico, a quantificação dos impactos associados às componentes III e V também é descrita aqui. Em suma, no presente item são abordados os tópicos contornados pela linha vermelha seccionada na Figura 4.7:

Figura 4.7: Temas abordados no presente item, dentre as principais dimensões do modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

A representação do processo decisório é descrita no item 4.5.5. Para fins de contextualização do leitor, antecipa-se que as variáveis de decisão consideradas como passíveis de manipulação por parte do planejador do sistema de transportes (exceto em cenários específicos, quando mencionado explicitamente) são:

- A frequência dos serviços de ônibus em cada período ($f_{bus,h}$) – que, na prática, é definida de modo a atender à demanda no modo ônibus em cada período h ;
- A implantação ou não de faixa exclusiva de ultrapassagem para TCO junto a paradas de ônibus, para aumento de capacidade das mesmas (ϕ_{cor});
- Concessão de subsídio aos usuários de TCO ($S_{bus,h}$)
- Cobrança de pedágio urbano aos usuários de TCO ($T_{car,h}$)

As variáveis de decisão consideradas são alinhadas ao admitido nos estudos de Basso et al. (2011) e Basso e Silva (2014). Em ambos os estudos citados, é permitida a opção entre o uso, ou não uso, de faixa exclusiva para tráfego de ônibus. No presente caso, por sua vez, posto que o sistema já opera com faixa exclusiva para o TCO no cenário de referência, a alternativa passa a ser alocar, ou não, uma segunda faixa exclusiva junto a paradas de ônibus – também subtraindo-se uma faixa de rolamento do tráfego geral, em caso positivo, em analogia aos referidos estudos. A alocação desta segunda faixa representa viabilizar manobras livres de ultrapassagem junto a paradas de ônibus, visando permitir a ampliação das paradas com maior eficiência operacional (e.g., escalonamento de linhas de ônibus e operação livre de interferências entre subparadas, conforme ocorre no cenário atual na Parada Eldorado do Corredor Rebouças).

Adicionalmente, visando reduzir os graus de complexidade do presente modelo, o dimensionamento da operação do sistema de TCO consiste em variar unicamente a frequência dos serviços em cada período, mantendo-se tamanhos de veículos, espaçamento entre paradas e outros aspectos tecnológicos e de infraestrutura fixos e em linha com o cenário de referência.

Por fim, destaca-se que as componentes de impacto econômico (variável “SW”, como em *social welfare*) apresentadas na sequência deste item são calculadas em $\left[\frac{R\$}{h*10km}\right]$, quando referentes a algum dos períodos de análise, e em $\left[\frac{R\$}{dia*10km}\right]$, quando referentes ao dia-de-trabalho – podendo ser interpretadas como o impacto da operação do sistema de transportes em um segmento de via de 10 km de extensão ao longo de uma hora (ou de um dia-de-trabalho).

4.5.1. Custos e receitas operacionais públicos

A representação dos custos e receitas operacionais públicos é naturalmente relevante para cômputo do impacto econômico do sistema de transportes sobre a sociedade. Trata-se de um impacto de natureza financeira e, portanto, bastante objetiva. Sua descrição se dá a partir de três componentes, a saber:

- i. Receitas operacionais do sistema de TCO;
- ii. Custos operacionais do sistema de TCO; e
- iii. Receitas operacionais associadas ao TIA.

A decomposição apresentada considera que os custos operacionais relevantes associados ao TIA são todos privados e já são contemplados na função de utilidade dos usuários que utilizam este modo para viajar. Isto equivale ao fato de que o modelo não contempla nenhuma fonte de custos financeiros públicos associados ao TIA. Uma implicação desta premissa é que variações em custos financeiros públicos associadas a variações nas condições operacionais do TIA não são captadas pelo presente modelo.

Postula-se que negligenciar custos públicos associados ao TIA é considerado aceitável em avaliações de impacto da operação do sistema de transportes uma vez que as fontes de custos financeiros públicos (e.g., as associadas a gestão e controle de tráfego) são pouco sensíveis a variações no fluxo veicular de automóveis no curto prazo. Com efeito, o entendimento exposto na frase anterior implica que a variação de Bem Estar relativa aos tais “custos públicos associados ao TIA” seja nula entre

cenários. A título de contextualização, esta premissa também é empregada em modelos como os utilizados por Basso et. al (2011), Basso e Silva (2014) e Basso et al. (2019).

Antes de prosseguir à descrição de cada componente, destaca-se que no cenário de referência considera-se que as componentes (i) e (ii) se anulam, com base no princípio de que o sistema atual apresenta equilíbrio financeiro. Para tanto, levou-se em consideração que o equilíbrio financeiro ocorre por meio de subsídio para o caso do Município de São Paulo, bem como que o equilíbrio financeiro contempla a operação de forma integrada (por meio de subsídio cruzado entre os diversos períodos de operação, não se resumindo aos períodos contemplados no dia-de-trabalho tal qual definido no modelo aqui proposto). As implicações matemáticas desta postulação são apresentadas na seção Apêndice: G).

Adicionalmente, destaca-se que a componente (iii) possui impacto nulo no cenário de referência por não haver cobrança pública pela circulação de automóveis na RMSP – esta componente é relevante apenas para cenários em que a cobrança pelo congestionamento é considerada.

4.5.1.1. Custos e receitas operacionais do sistema de transporte coletivo por ônibus

As receitas operacionais do sistema de TCO são provenientes exclusivamente das tarifas públicas cobradas dos usuários pela utilização de seus serviços. A equação (4.62) descreve o cálculo da receita operacional do sistema de TCO:

$$R_{op,bus,h} = y_{bus,h} * (T_{bus,h} - S_{bus,h}) \quad (4.62)$$

Na equação apresentada, dada em R\$/h, o parâmetro $T_{bus,h}$ representa a tarifa média efetivamente cobrada, após considerados todos os descontos e gratuidades empregados segundo a política tarifária vigente. O parâmetro $S_{bus,h}$, por sua vez, trata-se do subsídio a ser empregado pelo planejador do sistema representado no presente modelo.

Os custos operacionais ($C_{op,bus,h}$), por sua vez, são calculados de forma proporcional à frota em operação em cada período e à quilometragem total percorrida. A abordagem efetivamente utilizada é descrita na seção Apêndice: G).

4.5.1.2. Custos e receitas operacionais associadas ao transporte individual por automóveis

As receitas operacionais associadas ao TIA são provenientes exclusivamente da cobrança pelo congestionamento (CC). Conforme destacado por Prud'homme e Bocarejo (2005) e considerado por Basso e Silva (2014), um dos principais entraves para a implantação bem sucedida de cobrança pelo congestionamento em áreas urbanas reside nos sistemas de apoio à cobrança (e.g., de detecção, de fiscalização, para transações), por implicarem custos operacionais bastante representativos face às receitas operacionais. Desta forma, considera-se que apenas uma parcela do valor total pago pelos usuários de TIA é convertido em receitas públicas ($\%T_{car,0}$) – admitindo-se que 45% da receita total é destinada aos financiamento dos custos do sistema, igualmente ao considerado por Basso e Silva (2014). A equação (4.63) descreve o cálculo da receita pública associada ao TIA, dada em R\$/h:

$$R_{op,car,h} = \frac{y_{car,h}}{a_{car,h}} * (T_{car,h} * \%T_{car,0}) = \frac{y_{car,h}}{a_{car,h}} * (T_{car,h} * 55\%) \quad (4.63)$$

4.5.1.3. Ineficiências associadas ao emprego de fundos públicos

Basso e Silva (2014) admitem em seu estudo que a injeção de fundos públicos no sistema de transportes – que se dá, no presente contexto, na forma de subsídios – carrega ineficiências inerentes à administração pública. Tais ineficiências são fruto de aspectos genéricos, como ineficiências processuais e excessos burocráticos presentes na administração pública (comparativamente à administração privada) tanto na captação quanto na gestão de recursos, bem como de aspectos específicos, como ineficiências no processo de transferência de subsídios a operadores e/ou usuários.

Desta forma, considera-se no presente modelo a variável “*mcpf*” (*marginal cost of public funds*, ou custo marginal dos fundos públicos, em tradução livre), que majora os custos associados ao emprego de fundos públicos (i.e., $mcpf > 1$), detraindo parte do valor dos fundos públicos empregados na transação. Tal qual considerado por Basso e Silva (2014), seu emprego se dá de forma relativa, multiplicando a diferença entre custos e receitas públicas (montante que se trataria de subsídios externos ao sistema de transportes), e adotando-se $mcpf = 115\%$. A única adaptação feita à abordagem considerada no referido estudo consiste em considerar um valor igual à unidade para a variável *mcpf* em casos em que as receitas públicas superem os custos

públicos, de modo a evitar que um eventual lucro operacional seja majorado ao ser multiplicado pelo fator *mcpf* – conforme ilustrado na equação (4.68):

$$R_{op,m,wd} = \sum_{h=\{p;o\}} H_h * R_{op,m,h} \quad (4.64)$$

$$C_{op,bus,wd} = \sum_{h=\{p;o\}} H_h * R_{op,bus,h} \quad (4.65)$$

$$R_{op,wd} = R_{op,bus,wd} + R_{op,car,wd} \quad (4.66)$$

$$C_{op,wd} = C_{op,bus,wd} \quad (4.67)$$

$$mcpf = \begin{cases} 115\%, & se (C_{op,wd} - R_{op,wd}) > 0 \\ 100\%, & se (C_{op,wd} - R_{op,wd}) \leq 0 \end{cases} \quad (4.68)$$

4.5.2. Custos sociais dos efeitos externos

A partir dos efeitos externos associados à EVP, obtidos segundo as abordagens descritas no item 4.4, o método para valoração dos impactos econômicos associados ($SW_{EVP,global}$ e $SW_{EVP,local}$) é bastante objetivo: consiste em multiplicar cada impacto estimado (e.g., por hora; por dia; por ano) por seu valor unitário de impacto econômico correspondente. Em específico, consiste em multiplicar as EVP totais (medidas em toneladas de CO_{2eq}) pelo custo social do carbono (cf. Tabela 3.5 do item 3.4.1), e em multiplicar os anos de vida perdidos (YLL) por mortes prematuras pelo custo social da perda de um ano de vida (cf. Tabela 3.7 do item 3.4.2).

Partindo-se das equações (4.53), (4.58) e (4.61), os cálculos descritos são apresentados nas equações a seguir. Os parâmetros efetivamente utilizados nas equações são descritos no Apêndice. Destaca-se que os resultados da equação (4.70) são fornecidos já em base diária.

$$SW_{EVP,global,h} = -e_{CO_{2eq},h} * L * SCC \quad (4.69)$$

$$SW_{EVP,local,wd} = -\Delta M * L * \frac{YLL}{evento} * VOLY \quad (4.70)$$

4.5.3. Excedente do consumidor

Uma vez calculadas as utilidades sistemáticas de cada uma das alternativas dos usuários no planejamento de sua viagem (i.e., viajar no pico, viajar no fora-pico ou não viajar, cf. equações (4.40) a (4.42)), o cálculo do excedente do consumidor é obtido pela fórmula *logsum* (BASSO e SILVA, 2014), conforme descrito na equação (4.71). Destaca-se que a utilidade sistemática da alternativa de não viajar (V_{nt}) é omitida da equação, uma vez que é admitida como a alternativa de referência e com utilidade sistemática nula, bem como que este cálculo é realizado para o dia-de-trabalho como um todo, não se tratando de um cálculo realizado em base horária.

$$CS_{wd} = \frac{Y_{tot}}{\lambda_1} * \ln \left[\sum_h \exp(\lambda_1 * V_h) \right] \quad (4.71)$$

4.5.4. Projeção de resultados para o horizonte de análise

A projeção dos resultados para o horizonte de análise (i.e., dia-de-trabalho) é um dos aspectos explorados durante os exercícios conduzidos por meio da exploração do modelo analítico. Na abordagem padrão, os resultados de uma variável genérica “A” para o horizonte de análise (A_{wd} , referentes ao dia-de-trabalho, neste caso) são obtidos a partir dos valores de suas correspondentes nos períodos de análise a partir da equação (4.72):

$$A_{wd} = \sum_h (H_h * A_h) = H_p * A_p + H_o * A_o \quad (4.72)$$

4.5.5. Função de mérito do planejador

A formulação do processo decisório baseia-se na representação de um agente planejador que, a partir da manipulação de variáveis do sistema de transportes controladas pelo mesmo, busca maximizar o bem-estar social associado à operação do sistema. O Bem Estar Social (SW_{wd}) consiste, portanto, na função de mérito do problema e pode ser dado pela equação (4.73):

$$SW_{wd} = CS_{wd} + (R_{op,wd} - C_{op,wd}) * mcpf + SW_{EVP,global,wd} + SW_{EVP,local,wd} \quad (4.73)$$

Conforme destacado, as variáveis de decisão usuais são as listadas a seguir. A depender do tipo de cenário sendo avaliado, uma ou mais variáveis de decisão podem ser excluídas excepcionalmente deste conjunto.

- A frequência dos serviços de ônibus em cada período ($f_{bus,h}$) – na prática, determinados para atender a demanda no modo ônibus resultante das escolhas no nível inferior;
- Concessão de subsídio aos usuários de TCO ($S_{bus,h}$)
- Cobrança de pedágio urbano de subsídio aos usuários de TCO ($T_{car,h}$)

Por fim, resta estabelecer as restrições às quais o processo de otimização está sujeito. Há restrições de duas naturezas: práticas e de equilíbrio. As restrições de equilíbrio são equações resultantes das dinâmicas do modelo de tráfego e do modelo comportamental do usuário, que se mantêm em equilíbrio estático entre si, dados valores quaisquer assumidos pelas variáveis de decisão. Este artifício, também empregado por Basso e Silva (2014), implica o equilíbrio entre as decisões dos diferentes agentes envolvidos (i.e., decisões tomadas pelo planejador do sistema e decisões tomadas pelos usuários do sistema). Tais restrições consistem nas próprias equações do modelo de tráfego e do modelo comportamental dos usuários e, por simplicidade, podem ser representadas por sujeitar o problema de otimização a:

$$Y_{tot} = \sum_{h \in (o,p,nt)} Y_h \quad (4.74)$$

$$y_h = \sum_{m \in (car,bus)} y_{m|h} , \quad h \in (o,p) \quad (4.75)$$

As restrições práticas representam condições de contorno para a obtenção de resultados realistas e aplicáveis – podendo ser vinculadas a aspectos de natureza variada, como política, física, operacional ou orçamentária. No presente modelo, considera-se como restrições que tanto os subsídios como as cobranças por congestionamento devem assumir valores não-negativos. A mesma restrição é imposta, naturalmente, à frequência dos ônibus no corredor. Por fim, admite-se ainda que os subsídios devam ser iguais em ambos os períodos – equivalente a considerar que o sistema de TCO emprega uma única tarifa ao longo do dia. As restrições são descritas matematicamente a seguir:

$$f_{bus,h} > 0 \quad (4.76)$$

$$s_{bus,h} \geq 0 \quad (4.77)$$

$$s_{bus,p} = s_{bus,o} \quad (4.78)$$

$$T_{car,h} \geq 0 \quad (4.79)$$

5. APLICAÇÃO E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os cenários alternativos explorados a partir do modelo analítico e, então, discutidos os resultados obtidos. Os exercícios desenvolvidos buscam explorar os seguintes aspectos:

- Comparação do impacto de diferentes tipologias de intervenções sobre os usuários do sistema, os impactos econômicos associados às emissões veiculares de poluentes (EVP) e o bem estar social total;
- Relevância de se considerar os impactos das EVP no processo de tomada de decisão no âmbito do planejamento de transportes;
- Influência de premissas do método de avaliação econômica e do contexto do problema sobre as conclusões, tais quais:
 - Consideração ou não dos impactos das EVP;
 - Grau de congestionamento inicial;
 - Valoração atribuída aos efeitos finais das EVP; e
 - Abordagem para projeção dos resultados dos períodos de análise para o horizonte de análise.

A sequência deste capítulo é estruturada da seguinte forma: inicialmente, apresenta-se as tipologias de intervenções consideradas nos exercícios desenvolvidos; em seguida cada intervenção é descrita em termos de sua representação analítica dentro do modelo. Na sequência, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, contrastando-se, em etapas, os cenários relevantes para a exploração dos aspectos supracitados. Conforme considerado relevante, são apresentadas análises de sensibilidade às premissas empregadas, a fim de permitir uma melhor compreensão acerca dos fatores preponderantes sobre os resultados.

5.1. Tipologias de intervenções

Na exploração de cenários alternativos desenvolvida e detalhada neste capítulo, foram consideradas quatro tipologias de intervenções. Cada tipologia é representada por uma única modalidade de intervenção correspondente – uma vez que, por se tratar de um modelo estilizado, postula-se que intervenções de natureza similar tenderiam a produzir efeitos similares nos exercícios. As tipologias e as correspondentes intervenções são:

- i. **Intervenções em infraestrutura:** posto que, desde o cenário de referência, o segmento viário em análise já possui faixa exclusiva para

circulação do TCO, o cenário alternativo de infraestrutura considerado consiste na implantação de uma faixa exclusiva adicional ao TCO, junto às estações, por meio da supressão de uma faixa de rolamento dentre as três dedicadas ao tráfego geral no cenário Base. Tal intervenção visa permitir a livre realização de manobras de ultrapassagem junto a paradas e, assim, promover o aumento de capacidade das paradas ao possibilitar a extensão da parada com escalonamento de serviços em subparadas distintas. Este cenário/intervenção é referido pelo código “FU” (como em Faixa de Ultrapassagem).

- ii. **Intervenções operacionais:** visando representar ganhos operacionais associados aos elementos tipicamente presentes em sistemas de BRT, o cenário de melhoria operacional considerado consiste na viabilização de embarque e desembarque por todas as portas indistintamente e simultaneamente, sem presença de catracas dentro de veículos. Tal cenário é associado à operação com pagamento de tarifa desembarcado, de modo que se cria uma área paga em estações – passando toda a área interna dos veículos a ser, também, área paga e de livre circulação de passageiros. Este cenário/intervenção é referido pelo código “AP” (como em Área Paga).
- iii. **Intervenções tecnológicas:** nestas, o termo “tecnológicas” refere-se à tecnologia veicular – mais especificamente, à tecnologia dos motores dos veículos. O cenário adotado para representação desta tipologia de intervenções consiste em considerar toda a frota sendo composta por veículos elétricos. Este cenário/intervenção é referido por “OE” (como em Ônibus Elétricos).
- iv. **Intervenções de mercado:** a tipologia de intervenções de mercado consiste na manipulação dos preços para utilização de cada modo de transporte considerado, i.e., por meio da prática de subsídios (adicionais aos praticados no cenário de referência) e de cobrança por congestionamento. Em contextos específicos, esta intervenção é desagregada em cobranças em um único modo por vez, de modo a permitir a distinção de políticas de incentivo das de desincentivo aos usuários – i.e., políticas que reduzem ou introduzem custos para

realização de viagens, respectivamente. Estes cenários/intervenções são referidos por “CC/S” (como em Cobrança por Congestionamento e Subsídio) ou apenas “CC” ou “S”, a depender do cenário especificamente sendo considerado.

5.1.1. Representação dos cenários no modelo analítico

Uma vez definidas as intervenções a serem simuladas, procede-se com o desenvolvimento de sua representação no modelo analítico – exceto pelas intervenções de mercado, já naturalmente representadas na formulação original.

5.1.1.1. Faixa de Ultrapassagem

A implementação da FU faz-se relevante para aumento da capacidade do corredor, por meio do aumento da capacidade das paradas de ônibus (estações). Este efeito decorre da possibilidade de então implementar duas subparadas idênticas por paradas (i.e., com dois berços cada) que possam operar livres de interferência uma da outra. Baseado nesta hipótese, considera-se que a capacidade das paradas de ônibus é multiplicada por dois – ou, reciprocamente, que a frequência de serviços alocada a cada subparada corresponde a 50% da frequência total, em um esquema de escalonamento dos serviços entre as subparadas.

Com efeito, isto implica que as capacidades das paradas de ônibus no modelo são multiplicadas por dois para fins de cálculo das saturações e dos decorrentes tempos de atraso em fila. Em termos de capacidade viária, tal intervenção representa a supressão de uma faixa de rolamento para o tráfego comum (i.e., para o modo TIA, no presente modelo) e o aumento de uma faixa de rolamento para o modo TCO, resultando em duas das quatro faixas de tráfego disponíveis sendo alocadas para cada modo.

5.1.1.2. Área Paga

Para representação da variação do cenário base para um contexto com pagamento desembarcado de tarifas, de modo a permitir o embarque e desembarque de passageiros simultaneamente por todas as portas dos veículos, o cálculo do tempo gasto com embarques e desembarques de passageiros passa a ser função da demanda total por ponto, em vez de ser função apenas da demanda embarcando.

Os tempos unitários por passageiro também são alterados, sendo reduzidos ao considerar que haveria embarques/desembarques simultâneos pelas diferentes portas dos veículos. Para tanto, considera-se que a manobra de desembarque levaria em média 66% do tempo da manobra de embarque, baseado no sugerido por SZASZ (1995). Admitindo-se novamente que a frota de ônibus seja composta igualmente por ônibus do tipo padron e do tipo articulado – i.e., veículos usualmente com 2 e 3 portas de cada lado, respectivamente, resultando em uma média de 2,5 portas/veículo – o tempo médio unitário (por passageiro embarcando ou desembarcando) passa a ser dado por:

$$u\tau_{boa/ali} = \frac{u\tau_{boa/ali,0}}{n_{doors}} = \frac{u\tau_{board} * \frac{(1 + 0,66)}{2}}{n_{doors}} \quad (5.1)$$

$$u\tau_{boa/ali} = \frac{2,5 * \frac{(1 + 0,66)}{2}}{2,5} = 0,83 \frac{segundos}{pax} \quad (5.2)$$

Nos cálculos acima, o termo $\frac{2,5*(1+0,66)}{2}$ representa o tempo médio gasto por manobra de embarque ou desembarque, por passageiro (variável $u\tau_{boa/ali,0}$). Considerando que os passageiros levem 2,5 segundos para embarques e 66% deste tempo para desembarques, em média, resulta que $u\tau_{boa/ali,0} = 2,075$ segundos. Havendo embarques simultâneos por 2,5 portas em cada veículo, decorre que os passageiros demandam 0,83 segundos, em média, sob a configuração deste cenário.

5.1.1.3. Ônibus Elétricos

A consideração de eletrificação da frota não produz alterações operacionais, na forma como representada no presente modelo, de modo que não há implicação sobre os resultados do nível inferior do modelo analítico. Os efeitos consistem, primeiramente, de mudanças nos custos operacionais (i.e., os quilométricos, especificamente, considerando que não há alteração nos requisitos de mão de obra operacional) e nos custos do sistema (i.e., decorrentes dos diferentes custos proporcionais à frota, como os custos de aquisição e manutenção regular por veículo). Adicionalmente, há mudanças nas emissões unitárias associadas ao emprego de motores elétricos, em alternativa a motores a diesel.

A quantificação de tais alterações foi baseada na publicação *Cost and Emissions Appraisal Tool for Transit Buses* (Ferramenta de Avaliação de Custos e Emissões para Ônibus de Transporte Coletivo, em tradução livre), publicado pelo WRI (COOPER et al., 2019). A publicação traz valores de referência para custos e emissões para veículos movidos a motores de diferentes tecnologias, de forma genérica. Detalhes sobre a abordagem para obtenção dos valores empregados no modelo são fornecidos no Apêndice: I). São sumarizados na Tabela 5.1 os valores efetivamente empregados:

Tabela 5.1: Parâmetros para representação de frota elétrica na operação do TCO

Parâmetro	Unidade do parâmetro	Fator multiplicativo (relativo aos parâmetros de veículos do ciclo diesel)
Custos quilométricos (C_q)	$\frac{R\$}{\hat{o}nibus * km}$	43%
Custos horários (C_h)	$\frac{R\$}{\hat{o}nibus * hora}$	100%
Custos do sistema (C_s)	$\frac{R\$}{\hat{o}nibus * hora_{pico}}$	160%
Emissões unitárias de Dióxido de Carbono ($ue_{bus,CO_2,h}$)	$\frac{g}{VKM}$	0%
Emissões unitárias de Material Particulado ($ue_{bus,PM_{2.5},h}$)	$\frac{g}{VKM}$	52% ²⁵

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em COOPER et al. (2019)

5.2. Avaliação de tipologias de intervenções

Esta seção é dedicada à avaliação do potencial impacto de diferentes tipologias de intervenções sobre o segmento viário representado no modelo analítico, visando identificar os fenômenos e as interações que influem de forma preponderante sobre os resultados obtidos.

Os resultados são apresentados a partir de análises comparativas entre conjuntos de cenários, agrupados conforme o aspecto que se deseja explorar, organizadas em discussões sequenciais e encadeadas. Na seção inicial (seção 5.2.1), desenvolve-se uma análise exploratória mais detalhada, a fim de contribuir com a compreensão do

²⁵ Tal fator aplica-se não às emissões oriundas do escapamento, mas sim às emissões totais de material particulado, já considerando as emissões decorrentes de desgastes de peças (e.g., freio) e do pavimento.

leitor sobre os indicadores e elementos gráficos empregados na análise dos resultados. Nesta mesma seção, discute-se os resultados obtidos em contraste aos obtidos por Basso e Silva (2014), evidenciando as similaridades entre os modelos analíticos desenvolvidos.

Nas seções seguintes, são avaliadas intervenções de diferentes tipologias quando implementadas de forma isolada (seção 5.2.2) ou de forma combinada (seção 5.2.3) – neste caso, buscando identificar a presença de complementaridades ou sinergias entre intervenções de diferentes naturezas. Na seção 5.3, discute-se a sensibilidade dos resultados a aspectos identificados como relevantes ao longo das avaliações, elencados ao final da seção 5.2.4, bem como a relevância de se considerar impactos das EVP na avaliação de projetos no âmbito do planejamento de transportes – em particular, no segmento de transportes urbanos.

5.2.1. Exploração introdutória

Este item é utilizado com os propósitos de contrastar os resultados produzidos pelo modelo analítico com os obtidos por Basso e Silva (2014) e de introduzir o leitor aos elementos utilizados na análise dos resultados.

Na linha de discussão desenvolvida por Basso et al. (2011) e Basso e Silva (2014) a respeito da potencial complementaridade ou substitutabilidade entre faixas exclusivas (FEO) para o TCO²⁶ e intervenções de mercado (CC ou S), cabem destaques a duas conclusões delineadas, no âmbito da presente análise.

A primeira é a de que há pouco potencial de sinergia ou complementaridade entre as três medidas, i.e., os ganhos proporcionados por uma medida isoladamente não são majorados de forma relevante na presença de outras das medidas. Ao contrário, identificou-se algum grau de substitutabilidade entre as medidas nos estudos, posto que os benefícios incrementais com a implementação de dada medida (após a

²⁶ O termo “faixa exclusiva” (seja no singular ou no plural) será doravante empregado referindo-se à provisão de faixas dedicadas ao uso de veículos de transporte coletivo, subtraindo-se uma faixa de rolamento do tráfego misto, em cenários nos quais originalmente os veículos de transporte coletivo compartilham o espaço viário com os demais veículos em faixas de uso geral.

implantação de outras) resultaram inferiores, de modo geral, aos benefícios obtidos com a implementação isolada da respectiva medida.

A segunda, sobre a efetividade das medidas, é a de que subsídios tendem a promover ganhos de Bem Estar mais modestos que as outras duas – apesar de se mostrar preferível, do ponto de vista dos consumidores –, tendo as faixas exclusivas se mostrado como uma boa alternativa para a promoção de benefícios tanto para os usuários quanto para a sociedade.

Os resultados obtidos pelo mais recente dos referidos estudos é apresentado na Tabela 5.2, para ambas as cidades exploradas no estudo. Os autores reportaram que o aumento de bem estar causado pelo emprego de subsídios quando outras medidas estão implementadas é desprezível, quando não nulo ou negativo (BASSO e SILVA, 2014). Destaca-se, ao leitor, que o Excedente do Consumidor é uma das componentes do Bem Estar Social, havendo redundância nos indicadores apresentados a seguir.

Tabela 5.2: Resultados principais obtidos por Basso e Silva (2014)

Cidade	Indicador	S	FEO	CC	FEO + CC
Londres	Bem Estar Social [\$ /km/dia]	3.641	7.907	9.146	9.170
Londres	Excedente do Consumidor [\$ /km/dia]	7.404	7.977	2.998	4.905
Santiago	Bem Estar Social [\$ /km/dia]	359	1.110	482	1.110
Santiago	Excedente do Consumidor [\$ /km/dia]	2.834	1.135	-182	1.099

Fonte: Basso e Silva (2014)

No presente estudo, foram realizadas simulações de natureza similar, adicionando-se faixas (exclusivas) de ultrapassagem (FU) às faixas exclusivas, conforme descrito ao longo do capítulo anterior – uma vez que o cenário de referência já possui faixas exclusivas. Os resultados dos cenários simulados no âmbito da seção 5.2.1 são sumarizados na Tabela 5.3, agrupados em blocos de indicadores correlatos entre si. Conforme antecipado, esta primeira rodada de discussão contrasta os resultados obtidos por Basso e Silva (2014) com os obtidos a partir do presente modelo, comentando os resultados obtidos também à luz da introdução dos impactos associados às EVP no cálculo do Bem Estar.

Esclarece-se que o termo “Bem Estar Social” vem acompanhado de um asterisco, como na linha 1b da Tabela 5.3 e no eixo vertical da Figura 5.1, quando calculado sem a inclusão dos impactos das EVP (denominando-se “ Bem Estar Social* “). Gerou-se tal indicador, em adição ao indicador “Bem Estar Social” da forma como especificado na seção 4.5.5, para torná-lo comparável aos resultados obtidos por Basso et al. (2011) e Basso e Silva (2014) e, numa ótica mais ampla, para evidenciar os impactos de se considerar os impactos das EVP na avaliação da função de mérito – i.e., o próprio Bem Estar Social. Destaca-se que, em termos de ordem de grandeza, os resultados na Tabela 5.3 referem-se a um segmento viário de 10 km, ao passo que os resultados da Tabela 5.2 são relativos a um quilômetro de via.

Os códigos empregados na descrição dos cenários foram apresentados no início deste capítulo e são consolidados na Tabela 5.4. Nesta primeira rodada de discussão, os cenários Base + S e Base + CC foram omitidos pois resultaram equivalentes aos cenários Base e Base + CC/S, respectivamente (i.e., o subsídio resultou nulo na tomada de decisão por parte do planejador).

Antes de prosseguir para a análise dos resultados, destaca-se que o fato de o subsídio resultar nulo decorre principalmente de ter se impedido o aumento das tarifas no TCO, por parte do planejador do sistema, na simulação de cenários no modelo analítico (cf. equações (4.77) e (4.78)). O resultado de subsídio nulo indica que o ótimo social se daria com a prática de tarifas mais altas no TCO, visando introduzir efeito similar ao da CC, tendo em vista que no cenário Base o TCO também se encontra congestionado. Este ponto é discutido novamente na seção 5.3.4.

Tabela 5.3: Principais resultados – Exploração introdutória

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU	FU + S	FU + CC	FU + CC/S
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Δ Bem estar social [R\$/wd/10km]	0	60.814	56.822	81.852	211.370	231.240
1b	Δ Bem estar social* [R\$/wd/10km]	0	59.352	46.187	69.058	193.708	214.284
2	Δ Excedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	0	-152.379	830	365.639	-177.276	214.284
3	Δ Operação TCO [R\$/wd/10km]	0	-10.198	45.357	-296.582	46.552	-230.273
4	Δ Cobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	221.929	0	0	324.432	230.273

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU	FU + S	FU + CC	FU + CC/S
5	Δ GHG [R\$/wd/10km]	0	2.029	2.583	6.265	8.892	9.333
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	0	-568	8.052	6.529	8.771	7.623
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	8,15	0,00	0,00	16,10	14,24
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0%	0%	100%	0%	88%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	1,77	0,02
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0%	0%	100%	0%	88%
11	Frequência (p) [#h]	91	96	117	121	129	131
12	Frequência (o) [#h]	81	83	87	94	92	94
13	Velocidade (car,p) [km/h]	8,2	11,9	6,8	7,4	15,9	16,0
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	11,6	10,5	17,3	17,2	16,9	16,9
15	Velocidade (car,o) [km/h]	31,6	31,3	22,3	25,8	24,6	25,1
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	16,6	16,6	19,4	19,3	19,4	19,3
17	Viajantes no pico [%]	33,9%	33,0%	34,2%	34,8%	33,7%	34,1%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	44,4%	43,5%	43,7%	43,7%	44,1%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,6%	22,3%	21,5%	22,7%	21,9%
20	% Demanda (car,p) [%]	47,4%	42,9%	33,3%	31,8%	25,0%	24,6%
21	% Demanda (bus,p) [%]	52,6%	57,1%	66,7%	68,2%	75,0%	75,4%
22	% Demanda (car,o) [%]	49,4%	49,4%	45,8%	41,2%	42,8%	41,7%
23	% Demanda (bus,o) [%]	50,6%	50,6%	54,2%	58,8%	57,2%	58,3%

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.4: Legendas da nomenclatura dos cenários e respectiva descrição

Legenda	Descrição
Base	Cenário de referência
S	Emprego de subsídio aos usuários de TCO (em adição aos subsídios já praticados no cenário de referência)
CC	Emprego de cobrança aos usuários de TIA
CC/S	Combinação dos cenários CC e S
FU	Emprego de Faixa de Ultrapassagem exclusiva aos veículos de TCO junto a estações

Legenda	Descrição
AP	Emprego de pagamento desembarcado ("Área Paga")
OE	Emprego de ônibus com motores elétricos

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 5.3, os termos são os mesmos descritos no Capítulo 4, com exceção ao termo " Δ Operação TCO", que se refere à diferença entre o aumento de custos operacionais do sistema de TCO e dos custos de arrecadação do sistema de TCO – igual a zero, no cenário Base, por construção. Este indicador já considera as receitas efetivamente obtidas, isto é, descontado o subsídio fornecido às tarifas (nos cenários "S"). Além disso, destaca-se que os subsídios aos usuários de TCO são apresentados como fração da tarifa pública vigente no cenário Base.

Destaca-se que o Bem Estar Social e suas cinco componentes são apresentados em termos das diferenças absolutas, em relação ao cenário Base, assumindo o sinal negativo quando há redução de Bem Estar e sinal positivo quando há aumento de Bem Estar – e.g., uma variação positiva na variável " Δ GHG" indica aumento de Bem Estar (i.e., redução de emissões), em vez de aumento de emissões de gases de efeito estufa; analogamente, uma variação positiva na variável " Δ Operação TCO" indica um aumento de Bem Estar associado a ela, ou seja, um superávit operacional.

Na Figura 5.1 é ilustrado o resultado de cada cenário em termos de variações no Bem Estar e no Excedente do Consumidor, de forma conjunta. Conforme nota-se nos resultados apresentados, no presente estudo observou-se o mesmo fenômeno reportado por Basso e Silva (2014) no que diz respeito à limitada eficiência do subsídio, na presença de outras medidas: a eficácia do emprego de subsídio no aumento de Bem Estar resultou pequena, apesar do aumento expressivo no Excedente do Consumidor – o que se trata, nesta ótica, de uma transferência de recursos. Na Figura 5.1 é possível notar graficamente o fenômeno descrito.

Conforme destacado no estudo supracitado, ressalta-se que o aumento efetivo de Bem Estar decorrente do emprego de subsídios é dependente do custo marginal dos fundos públicos (variável *mcpf*) e da eficiência do processo de transferência de recursos.

Figura 5.1: Principais indicadores – Exploração introdutória

Fonte: Elaborado pelo autor

A alternativa considerando os impactos das EVP no cálculo do Bem Estar Social é apresentada na Figura 5.2. Antecipando parcialmente a discussão relativa à relevância de se considerar o impacto das EVP em avaliações de projetos, é possível notar que o resultado relativo entre os cenários é alterado de forma moderadamente relevante com a inclusão dos impactos associados às EVP. Nota-se que contemplar os impactos das EVP causou diferença suficiente para tornar a intervenção FU quase tão benéfica quanto as intervenções CC/S combinadas. Sem considerar os impactos das EVP, a intervenção FU gerava ganhos 22,2% inferiores aos obtidos no cenário “Base+CC/S” (cf. Tabela 5.3, linha 1). Após incluídos os impactos das EVP, a diferença passou a ser de 6,6% apenas. De todo modo, por se tratar de um dos objetos centrais de estudo desta dissertação, o tema é explorado em mais detalhes nos demais itens, adiante deste capítulo.

Figura 5.2: Principais indicadores – Exploração introdutória (complemento)

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 5.3 são apresentados os impactos sobre o Bem Estar Social em cada cenário, a partir de cada uma de suas componentes. As barras horizontais estão empilhadas e sua altura (ao longo do eixo horizontal) representa a magnitude da variação relacionada à respectiva componente. Barras à esquerda do eixo vertical central representam contribuições negativas ao Bem Estar (i.e., redução de Bem Estar Social), ao passo que barras à direita representam contribuições positivas (i.e., aumento de Bem Estar Social). As variações líquidas são reportadas junto ao nome dos cenários, à direita do gráfico, entre parênteses.

Figura 5.3: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Exploração Introdutória

Fonte: Elaborado pelo autor

Na imagem apresentada, é possível visualizar de forma comparativa como cada componente dos custos sociais contribuiu para a variação líquida observada em cada cenário. A componente “ Δ Operação TCO” é decomposta em “ Δ Receita TCO” e “ Δ Custo TCO”, para maior detalhamento. A interpretação desta componente segue a lógica das demais: variações positivas no termo “ Δ Receita TCO” representam ganho de Bem Estar, i.e., aumento de receita, e variações positivas no termo “ Δ Custo TCO” também representam ganho de Bem Estar, i.e., redução de custos.

Na interpretação de gráficos como este, deve-se ter em mente que um aumento na demanda do TCO naturalmente gera aumento de receita no TCO (Δ Receita TCO > 0), bem como dos custos associados (Δ Custo TCO < 0). Para ganho efetivo associado à migração modal, deve haver ganhos de receita superiores ao aumento dos custos. Nota-se, por exemplo, que no cenário “Base+CC/S” isto não ocorre, sendo a barra vermelha (Δ Custo TCO) mais espessa que a barra amarela (Δ Receita TCO) – o efeito líquido sobre a operação do TCO pode ser notado na linha 3 da Tabela 5.3. Na figura, fica também evidenciado que a parte mais relevante dos ganhos associados ao cenário “FU” reside em aumentar a rentabilidade da operação do TCO (ao gerar ganhos de receita aliados a uma sutil redução nos custos totais, mesmo com o aumento de usuários no TCO), apesar de haver ganho significativo associado à redução dos impactos das EVP.

Retomando a discussão sobre os resultados obtidos: no que diz respeito à ausência de complementaridade entre as medidas, os resultados ora obtidos indicam conclusões distintas. A efetividade da cobrança por congestionamento (CC) é amplificada na presença de faixas de ultrapassagem – i.e., com a ampliação da capacidade das paradas no corredor de ônibus e, logo, do corredor de ônibus em si.

O resultado descrito é entendido como consequência do aumento da capacidade do modo “ônibus” (TCO) em absorver parte da demanda originalmente usuária do modo “carro” (TIA) sem a geração de atrasos excessivos, na presença das faixas de ultrapassagem (FU). Nota-se que o fato de o TCO operar já sob congestionamento no cenário Base no Pico (velocidade de 11,6 km/h) impede que a migração modal decorrente da CC gere os ganhos usualmente esperados em termos de economias de densidade com o aumento de demanda no TCO.

Este aspecto pode ser melhor compreendido na Figura 5.4, na qual é possível notar que o ganho de Bem Estar vem fundamentalmente da receita proveniente da CC. Na figura, as barras representam o impacto progressivo sobre o Bem Estar Social associado a cada dimensão listada no eixo das abscissas. Os valores das barras correspondem aos valores das 6 primeiras linhas da Tabela 5.3, sendo cada uma das barras referente a uma das linhas, entre a 2ª e a 6ª linha. O valor da primeira linha da tabela (i.e., variação no Bem Estar Social) e corresponde ao impacto somado das cinco barras apresentadas – que, na figura, resulta em R\$ 61 mil/dia.

Figura 5.4: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “Base + CC/S”

Fonte: Elaborado pelo autor

Associada à operação de TCO, observa-se uma perda de Bem Estar decorrente de um aumento no custo médio por passageiro transportado. Tal ineficiência é decorrente da redução na velocidade operacional (de 11,6 km/h para 10,5 km/h) ocasionada pelo aumento no atraso médio. Posto que o nível de CC de R\$ 8,15 é o ótimo sob as configurações do cenário Base, entende-se que o aumento adicional no valor cobrado geraria um aumento de demanda no TCO que provocaria atrasos adicionais excessivos, minando a efetividade de medidas de incentivo à migração modal em direção ao TCO.

Este fenômeno é também ilustrado na Figura 5.5, na Figura 5.6 e na Figura 5.7, que ilustram custos sociais médios por passageiro*quilômetro, por modo, associados

a três fontes de externalidades selecionadas para fins de análise²⁷: Atraso, Emissões de GEE e Mortalidade. As fórmulas para cálculo de cada componente são apresentadas no último item do Apêndice.

Nas figuras a seguir, as referidas componentes do custo social médio são empilhadas por modo e aninhadas conforme o cenário ao qual se referem. Por exemplo, a primeira barra (da esquerda para a direita) corresponde aos custos sociais médios (por PKM) associados aos automóveis no cenário Base, ao passo que a segunda barra representa os custos análogos associados aos ônibus. As terceira e quarta barras, por sua vez, indicam os custos sociais médios por modo no cenário “Base+CC/S”. Finalmente, as tabelas abaixo dos gráficos exibem os valores mostrados no gráfico – nota-se que sob as barras referentes a um modo (e.g., automóveis) os valores do outro modo (e.g., ônibus) tem valor nulo, por construção.

Antes de prosseguir às análises, destaca-se dois detalhes adicionais: (i) nas figuras, sob o nome de cada cenário encontra-se o valor do custo social médio para o cenário como um todo (i.e., na média dos modos, ponderando-se pela quantidade de usuários de cada modo), e (ii) a Figura 5.6 repete os valores da Figura 5.5, omitindo-se a componente associada ao atraso para que seja possível visualizar graficamente a magnitude das demais.

²⁷ Foram selecionadas tais fontes de custos sociais por tratarem-se de fontes que incidem sobre os dois modos de forma comparável e envolverem as duas dimensões de análise da presente dissertação (i.e., ambos os efeitos das EVP) juntamente da tipicamente tida como maior externalidade presente nos sistemas de transportes em áreas urbanas (i.e., atrasos). A partir deste ponto, o termo “custos sociais médios” refere-se aos custos sociais médios selecionados para fins de análise.

Figura 5.5: Custos sociais médios no Pico – Exploração introdutória

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação às informações apresentadas nos gráficos de custo social médio: a ausência de capacidade no modo TCO para absorver parte da demanda do modo TIA pode ser observada na comparação entre a segunda e a quarta barra (da esquerda para a direita) da Figura 5.5, que evidencia um aumento no atraso médio por PKM (e, logo, por passageiro). O aumento é de 23% (i.e., equivalente a $\left(\frac{0,353}{0,286} - 1\right)$ – valores apresentados na quarta linha da tabela da Figura 5.5), decorrente de um aumento de demanda de 5,7% no TCO (i.e., equivalente a $\left(\frac{57,1\% * 33,0\%}{52,6\% * 33,9\%} - 1\right)$ – valores apresentados nas linhas 21 e 17 da Tabela 5.3). Comparando-se a situação do modo TIA nestes cenários, nota-se uma redução de 40% no atraso médio $\left(\frac{0,565}{0,939} - 1\right)$, decorrente de uma redução de 12% na demanda do modo $\left(\frac{42,9\% * 33,0\%}{47,4\% * 33,9\%} - 1\right)$.

Nos cenários correspondentes, ora na presença da FU, é possível observar que a CC é mais eficiente em reduzir o atraso do modo TIA na configuração de ótimo social $\left(\frac{0,352}{1,185} - 1\right)$, uma redução de 70%) uma vez que a migração modal e o aumento de demanda no TCO resultantes $\left(\frac{75,0\% * 33,6\%}{66,7\% * 34,2\%} - 1\right)$, um aumento de demanda de 10,5% no TCO) não provoca aumento relevante no atraso neste modo $\left(\frac{0,091}{0,083} - 1\right)$, um aumento

de 9,6%) e pode, portanto, ser promovida em maior intensidade pelo planejador do sistema. Este resultado indica que a efetividade da CC é vinculada à capacidade dos demais modos em absorver a demanda originalmente usuária do TIA. Nos cenários com restrição de capacidade no corredor de ônibus (configuração Base), cobranças acima de R\$ 8,15/viagem tornam-se antieconômicas, ao passo que nos cenários com FU o ótimo social é atingido com cobranças da ordem do dobro desse valor (i.e., R\$ 14,24 e R\$ 16,10).

Na Figura 5.6, por sua vez, é possível notar que as variações nos custos médios associados às EVP ocorrem de forma mais modesta que os custos associados a atrasos, com variações mais pronunciadas principalmente com a implantação de Faixa de Ultrapassagem. Este resultado é consistente com a expectativa de que as externalidades associadas às EVP sejam menos dependentes do congestionamento, ao contrário do atraso.

Figura 5.6: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Exploração introdutória

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro ponto que merece destaque é o fato de, no Fora-Pico (Figura 5.7), o custo social médio por passageiro*quilômetro ser maior no TCO, no cenário Base, tanto em termos de Atrasos como em relação aos custos decorrentes das EVP. Este fato resulta da ocupação reduzida dos veículos de transporte coletivo usualmente observada

nestes períodos, bem como do menor grau de congestionamento tipicamente enfrentada no modo TIA (ambas comparações relativas ao Pico).

No cenário Base do modelo analítico, as ocupações médias são de 85% (Pico) e 45% (Fora-Pico), resultando em custos sociais médios (por PKM) associados às EVP (variáveis “ $\overline{SW}_{EVP}$ ”) no TCO de 67% (Pico) e 156% (Fora-Pico), em comparação ao TIA. No agregado do dia-de-trabalho, a razão $\frac{\overline{SW}_{EVP,bus,wd}}{\overline{SW}_{EVP,car,wd}}$ no cenário Base representa 91%, i.e., ainda inferior à unidade, ilustrando a efetividade da migração modal como instrumento de mitigação dos impactos associados às EVP.

Figura 5.7: Custos sociais médios no Fora-Pico – Exploração introdutória

Fonte: Elaborado pelo autor

Antes de seguir para as discussões do item seguinte, destaca-se que os custos sociais médios por passageiro*quilômetro no Pico são da ordem de 8 vezes os custos médios no Fora-Pico no cenário Base (i.e., R\$ 0,64/PKM e R\$ 0,079/PKM, respectivamente), indicando que a tomada de decisão acaba sendo naturalmente pautada pelo seu impacto no Pico. Essa relação varia entre cenários, uma vez que os custos sociais médios variam de forma relevante no Pico mas mantêm-se aproximadamente estáveis no Fora-Pico, o que ainda sugere que distorções podem facilmente surgir caso não se avalie especificamente os períodos que não o período

Pico na etapa de projeção dos resultados dos períodos de análise para o horizonte de análise.

5.2.2. Diferentes tipologias de intervenções

As quatro tipologias descritas no início do capítulo foram avaliadas com base no modelo analítico desenvolvido. Para fins de análise, o cenário “FU” foi desagregado em dois, considerando a implantação de FU apenas no período Pico (“FU (p)”) como estágio intermediário, sendo o cenário “FU(p+o)” equivalente ao cenário “FU” apresentado anteriormente (considerando Faixa de Ultrapassagem implementada em ambos os períodos).

Primeiramente, avaliou-se seu desempenho isolado e, então, o desempenho de combinações destas intervenções. Na Tabela 5.5 são apresentados os resultados obtidos na avaliação de cada tipologia individualmente. Destaca-se que, ao longo da sequência deste capítulo, o resultado de alguns dos cenários é repetido para tornar mais prática a análise comparativa dos resultados.

Tabela 5.5: Principais resultados – Diferentes tipologias de intervenção

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU (p)	FU (p+o)	AP	OE
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Δ Bem estar social [R\$/wd/10km]	0	60.814	67.566	56.822	142.232	35.450
1b	Δ Bem estar social* [R\$/wd/10km]	0	59.352	54.578	46.187	135.412	5.473
2	Δ Excedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	0	-152.379	29.534	830	115.195	0
3	Δ Operação TCO [R\$/wd/10km]	0	-10.198	25.044	45.357	20.217	5.473
4	Δ Cobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	221.929	0	0	0	0
5	Δ GHG [R\$/wd/10km]	0	2.029	6.123	2.583	877	6.657
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	0	-568	6.865	8.052	5.943	23.320
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	8,15	0,00	0,00	0,00	0,00
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU (p)	FU (p+o)	AP	OE
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
11	Frequência (p) [#h]	91	96	116	117	96	91
12	Frequência (o) [#h]	81	83	81	87	82	81
13	Velocidade (car,p) [km/h]	8,2	11,9	6,8	6,8	8,6	8,2
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	11,6	10,5	17,3	17,3	14,1	11,6
15	Velocidade (car,o) [km/h]	31,6	31,3	31,7	22,3	31,9	31,6
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	16,6	16,6	16,8	19,4	17,8	16,6
17	Viajantes no pico [%]	33,9%	33,0%	34,1%	34,2%	34,5%	33,9%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	44,4%	43,7%	43,5%	43,4%	43,8%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,6%	22,2%	22,3%	22,1%	22,3%
20	% Demanda (car,p) [%]	47,4%	42,9%	33,3%	33,3%	45,8%	47,4%
21	% Demanda (bus,p) [%]	52,6%	57,1%	66,7%	66,7%	54,2%	52,6%
22	% Demanda (car,o) [%]	49,4%	49,4%	49,3%	45,8%	48,9%	49,4%
23	% Demanda (bus,o) [%]	50,6%	50,6%	50,7%	54,2%	51,1%	50,6%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.8: Principais resultados – Diferentes tipologias de intervenção

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.9: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Diferentes tipologias de intervenção

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível notar que os efeitos associados às EVP representam impacto suficiente para tornar o cenário “FU(p)” mais benéfico que o cenário considerando apenas intervenções de mercado sobre o sistema (i.e., cenário “Base+CC/S”) – ao passo que, sem considerar-se os impactos das EVP, este cenário apresenta-se como mais

benéfico que aquele. Em outras palavras, os impactos associados às EVP seriam suficientemente relevantes para alterar a decisão do planejador do sistema, na opção entre as duas intervenções citadas.

Além disso, é possível observar que cada intervenção promove efeitos essencialmente distintos. O cenário “Base+CC/S” é alicerçado na redução da demanda por automóveis, provocando aumento no Bem Estar através da geração de receita para o poder público, que não é reinvestida no sistema em forma de subsídios uma vez que o sistema de TCO encontra-se também congestionado, conforme discutido na rodada anterior e detalhado na Figura 5.4. Os impactos sobre as emissões de poluentes são negligenciáveis, havendo ganho associado a emissões de GEE (provenientes majoritariamente do TIA, cuja velocidade passa de 8,2 km/h para 11,9 km/h) e perdas associadas a emissões de PM (provenientes majoritariamente dos ônibus, cuja velocidade passa de 11,6 km/h para 10,5 km/h).

Os cenários “FU” produzem benefícios decorrentes principalmente do aumento de eficiência no sistema de TCO e dos impactos associados às EVP. A redução de custos associados às EVP decorre tanto do aumento das velocidades operacionais do TCO quando da migração modal do TIA para o TCO, uma vez que o TCO apresenta custos sociais médios decorrentes das EVP inferiores ao TIA (cf. Figura 5.11 e Figura 5.12). Nota-se que há impacto líquido negativo com a inclusão de faixas de ultrapassagem no Fora-Pico – tanto no Bem Estar como nos impactos associados às EVP.

O cenário “AP” produz ganhos ao excedente do consumidor relevantes, uma vez que oferece ganhos de eficiência operacional (i.e., redução nos tempos de viagem), produzindo ainda ganhos associados à redução de externalidades associadas às EVP. Ainda que os ganhos operacionais e as reduções nos custos sociais das EVP sejam mais modestas, em comparação aos cenários “FU”, o impacto líquido do cenário “AP” é mais positivo pois a intervenção não promove desincentivos ao modo TIA.

Finalmente, o cenário “OE” proporciona o menor benefício dentre as alternativas. Não há benefício ou prejuízo direto aos usuários, por tratar-se de uma intervenção que não afeta o desempenho operacional do sistema de transportes. Os benefícios são provenientes tanto de economias em custos operacionais quanto em reduções dos impactos associados às EVP. Os custos operacionais são reduzidos, apesar do aumento no custo de aquisição dos veículos, uma vez que os custos quilométricos

são reduzidos com o uso da energia elétrica como combustível. Por se tratar de uma mudança tecnológica exclusivamente empregada nos veículos do TCO, as reduções de EVP evitam custos sociais associados especialmente à mortalidade prematura (indicador “ Δ Mortalidade”), por meio de reduções nas emissões de PM.

Posto que o cenário “Base + CC/S” já fora discutido na rodada anterior, prossegue-se com a análise isolada dos demais cenários. Antes das seções específicas de cada cenário, são apresentados nas figuras a seguir os custos sociais médios em cada cenário.

Figura 5.10: Custos sociais médios no Pico – Diferentes tipologias de intervenção

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.11: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Diferentes tipologias de intervenção

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.12: Custos sociais médios no Fora-Pico – Diferentes tipologias de intervenção

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2.1. Faixa de Ultrapassagem

Os impactos sobre o Bem Estar no cenário “FU(p)” são detalhados na Figura 5.13. É possível notar que há ganho em todas as dimensões (exceto na cobrança ao TIA,

que permanece com efeito nulo por não ser praticada), com reduções em ambas as componentes relacionadas às EVP.

A partir dos custos médios sociais neste cenário (Figura 5.10 a Figura 5.12), nota-se que os ganhos decorrem de reduções nos custos associados aos passageiros de ônibus, tanto em termos de atraso quanto em termos de custos associados a emissões. Há ainda ganho de eficiência associado aos custos do sistema de TCO, decorrente do aumento de velocidade nos veículos de TCO, o que reduz o tamanho da frota necessária para operação.

Figura 5.13: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “FU(p)”

Fonte: Elaborado pelo autor

As emissões unitárias dos ônibus são reduzidas sobretudo no Pico, fazendo com que os custos médios associados à poluição sejam reduzidos em 32% (de 0,034 R\$/PKM para 0,023 R\$/PKM, cf. Figura 5.11) – predominantemente devido a emissões de PM evitadas. A velocidade dos automóveis sofre queda (de 8,2 km/h para 6,8 km/h), destacando o caráter ambivalente desta intervenção, no que diz respeito a promover incentivos ao TCO e desincentivos ao TIA. Destaca-se que todos os efeitos descritos se concentram no Pico, permanecendo o Fora-Pico aproximadamente inalterado – havendo 4% de redução nos custos sociais médios no período associada aos ganhos de velocidade em ambos os modos, devido à migração de passageiros para o Pico.

Neste cenário, é possível identificar que não contemplar os impactos das EVP na avaliação de impacto acarretaria uma subestimativa de aproximadamente 20% nos benefícios decorrentes da intervenção (de R\$ 68 mil para R\$ 55 mil, cf. Tabela 5.5, linhas 1 e 1b). Nota-se que no cenário “Base+CC/S” a relevância dos impactos das EVP é inferior, gerando uma diferença de R\$ 1,5 mil (2%).

A discrepância no que diz respeito à relevância de se considerar os impactos das EVP ocorre pois os ganhos de Bem Estar no cenário “Base+CC/S” decorrem principalmente da receita gerada pela CC, ao passo que no cenário “FU(p)” os ganhos decorrem de melhorias operacionais no ônibus. A arrecadação tarifária no cenário “Base+CC/S” não possui sinergia direta com a redução de emissões – ao contrário das melhorias operacionais, que permitem a redução supracitada de 32% nos custos sociais médios associados às EVP nos ônibus. Adicionalmente, a migração modal é superior no cenário “FU(p)” (66,7% utilizam TCO, contra 57,1% no cenário “Base+CC/S” – ambos no Pico) e, posto que os custos sociais médios associados às EVP no Pico são praticamente o dobro no TIA, em comparação ao TCO, este aspecto também possui sinergia com reduções dos impactos das EVP no cenário “FU(p)”.

No cenário “FU(p+o)”, por sua vez, surgem efeitos no Fora-Pico que provocam perda líquida de Bem Estar de R\$ 11 mil (das quais, R\$ 3 mil associadas às EVP, cf. Figura 5.14), em comparação ao cenário “FU(p)”. Resulta que os usuários acabam por ser penalizados com a implantação de Faixa de Ultrapassagem, com os desincentivos impostos ao modo TIA (cuja velocidade é reduzida de 31,7 km/h para 22,3 km/h) sobrepondo-se aos benefícios ocasionados aos usuários do modo TCO. Os custos associados às emissões de GEE (predominantemente associados ao modo TIA) aumentam em R\$ 4 mil, em relação ao cenário “FU(p)”, ao passo que os custos associados a mortalidade prematura (predominantemente associados ao modo TCO) diminuem R\$ 1 mil, gerando o efeito líquido supracitado.

Como aspecto positivo da intervenção, é possível destacar o aumento na rentabilidade da operação do TCO, decorrente das melhorias operacionais induzidas pela supressão de uma faixa de tráfego para o tráfego geral, conforme ilustrado na Figura 5.9.

Figura 5.14: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “FU(p+o)”

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2.2. Área Paga

A implantação de pagamento de tarifa desembarcado, viabilizando a realização de manobras de embarque e desembarque por todas as portas dos veículos simultaneamente (cenário referido por “Área Paga”), proporciona efeitos distintos dos cenários “FU”, apesar de também proporcionar o aumento de capacidade no corredor de TCO ao reduzir a saturação das paradas. As principais distinções em relação à FU decorrem de se tratar de um aumento mais modesto de capacidade no TCO e de não se impor, simultaneamente, desincentivos ao uso do TIA – implicando menor migração modal, com 54,2% dos usuários no Pico utilizando o TCO, contra 66,7% nos cenários “FU”.

Tais efeitos traduzem-se nos impactos ilustrados na Figura 5.15, na qual é possível observar um grande aumento no Excedente do Consumidor (uma vez que há ganhos aos usuários de TCO sem desincentivos aos usuários de TIA) e impactos moderados nas demais dimensões, em comparação aos cenários “FU”. De todo modo, nota-se que não há impactos negativos em nenhuma das dimensões.

Figura 5.15: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “AP”

Fonte: Elaborado pelo autor

Convém destacar que, por não promover desincentivos, raramente tal intervenção promoveria prejuízos operacionais. No caso dos cenários “FU”, por sua vez, é necessário que os benefícios superem os prejuízos decorrentes dos desincentivos impostos aos usuários do TIA.

Sem que se promova maior migração modal e com melhorias operacionais mais modestas no corredor de ônibus, ganhos pela redução dos impactos de EVP são inferiores no cenário “AP”. Isso não impediu, todavia, que este cenário se mostrasse como o mais vantajoso do ponto de vista das variações no Bem Estar total – conclusão esta que independe de se contemplar os impactos das EVP na avaliação.

5.2.2.3. Ônibus Elétricos

Os impactos no cenário “OE” são menos complexos, uma vez que não afetam o desempenho operacional. Conforme ilustrado na Figura 5.16, este cenário é o que promove os maiores benefícios associados aos custos sociais decorrentes das EVP. A tais benefícios, soma-se as reduções dos custos operacionais no sistema de TCO, representando 15% dos benefícios totais. Apesar de a frota eletrificada apresentar elevados custos de aquisição, a maior vida útil, os menores custos de manutenção e os custos quilométricos reduzidos – em relação aos veículos do ciclo diesel, segundo os valores apresentados por Cooper et al. (2019) – tornam os ônibus elétricos uma alternativa benéfica não só do ponto de vista dos impactos associados às EVP. Os

resultados indicam que os investimentos adicionais requeridos pelos veículos elétricos são parelhos aos benefícios gerados, podendo haver benefícios líquidos ou não a depender de detalhes presentes no contexto de análise.

Figura 5.16: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “OE”

Fonte: Elaborado pelo autor

Naturalmente, os benefícios ocasionados pelo cenário “OE” são intimamente dependentes da valoração atribuída aos impactos das EVP. Tal aspecto é explorado adicionalmente na seção 5.3.4.

5.2.3. Complementaridade entre tipologias de intervenções

Em adição a avaliação de impacto das intervenções quando implementadas isoladamente, desenvolve-se neste item exercícios para análise do impacto combinado de tais intervenções, permitindo que se examine a presença de complementaridade entre as tipologias de intervenções. O exercício fundamental consiste em combinar as intervenções de mercado com as demais, por ser mais informativa, uma vez que o planejador do sistema tem, nos instrumentos de preço, ferramentas mais flexíveis para manipular o comportamento dos usuários em direção ao ótimo social.

No presente texto, ao dizer que há complementaridade entre duas intervenções referidas por “A” e “B”, refere-se ao fenômeno de uma intervenção “A” promover ganhos similares aos que teria se implementada de forma isolada, quando

implementada juntamente de uma dada intervenção “B”. Conforme o ganho obtido isoladamente por cada intervenção se reduz quando implementadas em conjunto, diz-se que passa a haver substitutabilidade entre as intervenções. Quando o ganho incremental de se implementar “A” é superior ao observado na implementação de “A” isoladamente, diz-se que há sinergia entre as ditas intervenções.

O item é estruturado em duas partes: a primeira, analisando intervenções de Engenharia sobre sistema de transportes (“AP” e “FU”), e; a segunda, analisando o potencial de complementaridade da eletrificação da frota com as demais intervenções.

5.2.3.1. Intervenções de Engenharia

Nesta primeira parte das análises, são avaliadas as duas intervenções de Engenharia em combinação com as intervenções de mercado e entre si. Os resultados principais são apresentados na Tabela 5.6 e ilustrados nos gráficos a seguir (Figura 5.17, Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21).

Tabela 5.6: Principais resultados – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado

#	Indicador	Base	FU	FU + CC/S	AP	AP + CC/S	FU + AP
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Δ Bem estar social [R\$/wd/10km]	0	56.822	231.240	142.232	225.540	100.796
1b	Δ Bem estar social* [R\$/wd/10km]	0	46.187	214.284	135.412	217.152	87.343
2	Δ Excedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	0	830	214.284	115.195	-35.991	34.533
3	Δ Operação TCO [R\$/wd/10km]	0	45.357	-230.273	20.217	13.106	52.810
4	Δ Cobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	0	230.273	0	240.038	0
5	Δ GHG [R\$/wd/10km]	0	2.583	9.333	877	3.533	3.025
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	0	8.052	7.623	5.943	4.854	10.429
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	0,00	14,24	0,00	9,33	0,00
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0%	88%	0%	0%	0%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0%	88%	0%	0%	0%

#	Indicador	Base	FU	FU + CC/S	AP	AP + CC/S	FU + AP
11	Frequência (p) [#h]	91	117	131	96	103	118
12	Frequência (o) [#h]	81	87	94	82	83	87
13	Velocidade (car,p) [km/h]	8,2	6,8	16,0	8,6	13,8	6,9
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	11,6	17,3	16,9	14,1	12,9	18,5
15	Velocidade (car,o) [km/h]	31,6	22,3	25,1	31,9	31,7	22,5
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	16,6	19,4	19,3	17,8	17,7	20,0
17	Viajantes no pico [%]	33,9%	34,2%	34,1%	34,5%	33,6%	34,3%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	43,5%	44,1%	43,4%	44,0%	43,4%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,3%	21,9%	22,1%	22,4%	22,2%
20	% Demanda (car,p) [%]	47,4%	33,3%	24,6%	45,8%	39,8%	33,0%
21	% Demanda (bus,p) [%]	52,6%	66,7%	75,4%	54,2%	60,2%	67,0%
22	% Demanda (car,o) [%]	49,4%	45,8%	41,7%	48,9%	48,9%	45,7%
23	% Demanda (bus,o) [%]	50,6%	54,2%	58,3%	51,1%	51,1%	54,3%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.17: Principais indicadores – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.18: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado

É possível notar que ambas as intervenções de Engenharia possuem complementaridade com intervenções de mercado, conforme já identificado no item 5.2.1, uma vez que aumentam a capacidade do modo TCO em absorver adequadamente parte da demanda originalmente usuária do TIA. Promover tais ganhos de capacidade no sistema de TCO é relevante tendo em vista que as políticas de preço visam induzir a migração modal em favor do TCO com o objetivo de reduzir as externalidades no sistema de transportes – posto que os custos sociais médios são mais elevados no TIA, no Pico (cf. Figura 5.19).

Tal complementaridade incide tanto em termos de Bem Estar Social quanto no que diz respeito especificamente aos impactos decorrentes das EVP. A prática de CC/S isoladamente promove ganhos de R\$ 61 mil/dia/10km, dos quais R\$ 1 mil/dia/10km são relativos a impactos das EVP evitados (cf. Tabela 5.5, linhas 1-6). No cenário “FU+CC/S”, o impacto incremental da manipulação das políticas de preço (i.e., cobrança por congestionamento e subsídios) é de R\$ 174 mil/dia/10km (relativamente ao cenário “FU”), dos quais R\$ 6 mil/dia/10km decorrem da redução dos impactos associados às EVP (cf. Tabela 5.6, linhas 1 e 1b), havendo forte sinergia entre as intervenções.

No cenário “AP+CC/S”, por sua vez, também se observa sinergia, ainda que em menor grau. Os impactos incrementais são da ordem de R\$ 83 mil/dia/10km e R\$ 2 mil/dia/10km. Destaca-se que, apesar de a intervenção “AP” oferecer maior ganho quando implementada isoladamente, a intervenção “FU” proporciona maior ganho

quando combinada com as intervenções de mercado. Reitera-se que isso está relacionado ao fato de a FU promover maior aumento de capacidade para atendimento à demanda originalmente usuária do TIA. Desta forma, entende-se que a migração modal em favor do TCO se mostra um meio relevante para a promoção de benefícios sociais, com a ressalva de que se consiga acomodar adequadamente à demanda adicional no TCO – destacando a importância de se representar de forma precisa a operação nos sistemas de TCO em métodos de avaliação de projetos.

Figura 5.19: Custos sociais médios no Pico – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.20: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.21: Custos sociais médios no Fora-Pico – Complementaridade entre intervenções de Engenharia e de mercado

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observa-se na Figura 5.22 e na Figura 5.23, a seguir, a arrecadação proveniente da CC é reinvestida em forma de subsídio no cenário “FU+CC/S” (Figura 5.22), uma vez que o modo TCO apresenta-se em menor grau de saturação. Destaca-se que a CC é primariamente necessária do ponto de vista de reduzir-se a demanda no TIA e, assim, reduzir-se as externalidades geradas.

O oposto ocorre no cenário “AP+CC/S” (Figura 5.23), com a maior parte do incremento de Bem Estar sendo proveniente das próprias receitas geradas pela CC. Com efeito, não se reinveste o montante arrecadado uma vez que aumentos de demanda geram maiores atrasos incrementais (juntamente de outros custos sociais adicionais) à medida que o sistema se torna mais saturado. Conforme observa-se na Figura 5.19, os custos sociais médios no TCO são 94% maiores no cenário “AP” que no cenário “FU” (i.e., $\frac{SW_{AP,bus,p}}{SW_{FU,bus,p}} = \frac{0,179+0,025+0,003}{0,083+0,020+0,003} - 1 = 94\%$), no Pico. Com efeito, resulta que a migração modal é inferior no cenário “AP+CC/S”, em relação ao cenário “FU+CC/S” (com 60,2% da demanda utilizando o TCO, contra 75,4%, no cenário “FU+CC/S” – ambos no Pico).

Figura 5.22: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “FU+CC/S”

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.23: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Cenário “AP+CC/S”

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando-se o cenário “FU+AP”, nota-se resultados peculiares: em termos Bem Estar, a implantação de FU gera prejuízos, na presença de AP, devido aos atrasos ocasionados aos usuários do TIA com a redução da capacidade viária – sem que haja ganhos na mesma proporção para o TCO, uma vez que a implantação de AP já promovera ganhos operacionais no corredor de ônibus. Deste ponto de vista, nota-se o oposto a uma complementaridade entre ambas. Por outro lado, os impactos associados aos efeitos das EVP vão de R\$ 7 mil/dia/10km (AP) e R\$ 11 mil/dia/10km (FU) para R\$ 13 mil/dia/10km (FU+AP), havendo alguma complementaridade ao considerar-se especificamente os impactos associados às EVP.

Na comparação dos benefícios identificados em relação aos efeitos das EVP – entre os cenários “AP” e “FU+AP” especificamente – observa-se indicativos da relevância da migração modal como medida mitigadora de tais efeitos. Nos referidos cenários, os usuários de TCO representam 54,2% e 67,0% (“AP” e “FU+AP”) da demanda, no Pico, e 51,1% e 54,3%, no Fora-Pico. Adicionalmente, uma vez que as externalidades associadas às EVP são menos variáveis com o grau de congestionamento da operação, o ônus de se impor um gargalo de capacidade ao TIA (a fim de estimular a migração modal) representa perdas moderadas face aos benefícios obtidos com a migração modal no âmbito dos efeitos das EVP.

A relevância da migração modal para reduções nos impactos das EVP é evidenciada, também, na comparação entre os cenários “FU” e “AP+CC/S”. Para fins

de contextualização, o uso do modo TCO é de 66,7% e 60,2% em cada cenário, respectivamente (no Pico).

O cenário FU implica maiores ganhos de Bem Estar associados à redução dos impactos das EVP, mesmo sem o emprego combinado de intervenções de mercado e de Engenharia. Isso destaca que, do ponto de vista da redução dos impactos das EVP, a efetividade das intervenções está associada à capacidade de uma intervenção, ou de um conjunto de intervenções, em fornecer o conjunto de incentivos, desincentivos e ganhos operacionais adequados. O termo “adequado” é propositalmente vago: a medida de quais incentivos, desincentivos e melhorias operacionais que se deve promover é essencialmente dependente das características do cenário em análise. Destaca-se que o conceito de o que é efetivamente adequado é sujeito a interferências, também, do método de avaliação, conforme explorado adicionalmente nos itens a seguir.

5.2.3.2. Eletrificação da frota

Neste tópico são exploradas interações entre a eletrificação da frota e as demais intervenções. Os resultados dos cenários explorados são apresentados na Tabela 5.7, na Figura 5.24 e na Figura 5.25.

Tabela 5.7: Principais resultados – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções

#	Indicador	FU	FU+OE	AP	AP+OE	Base+CC/S	OE+CC/S
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Δ Bem estar social [R\$/wd/10km]	56.822	94.988	142.232	178.128	60.814	94.288
1b	Δ Bem estar social* [R\$/wd/10km]	46.187	57.463	135.412	144.127	59.352	61.897
2	Δ Excedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	830	830	115.195	115.195	-152.379	-148.726
3	Δ Operação TCO [R\$/wd/10km]	45.357	56.632	20.217	28.932	-10.198	-7.394
4	Δ Cobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	0	0	0	221.929	218.017
5	Δ GHG [R\$/wd/10km]	2.583	9.383	877	7.412	2.029	8.841
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	8.052	28.143	5.943	26.589	-568	23.550
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	8,15	7,98

#	Indicador	FU	FU+OE	AP	AP+OE	Base+CC/S	OE+CC/S
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
11	Frequência (p) [#h]	117	117	96	96	96	96
12	Frequência (o) [#h]	87	87	82	82	83	83
13	Velocidade (car,p) [km/h]	6,8	6,8	8,6	8,6	11,9	11,8
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	17,3	17,3	14,1	14,1	10,5	10,5
15	Velocidade (car,o) [km/h]	22,3	22,3	31,9	31,9	31,3	31,3
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	19,4	19,4	17,8	17,8	16,6	16,6
17	Viajantes no pico [%]	34,2%	34,2%	34,5%	34,5%	33,0%	33,0%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,5%	43,5%	43,4%	43,4%	44,4%	44,4%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,3%	22,1%	22,1%	22,6%	22,6%
20	% Demanda (car,p) [%]	33,3%	33,3%	45,8%	45,8%	42,9%	43,0%
21	% Demanda (bus,p) [%]	66,7%	66,7%	54,2%	54,2%	57,1%	57,0%
22	% Demanda (car,o) [%]	45,8%	45,8%	48,9%	48,9%	49,4%	49,4%
23	% Demanda (bus,o) [%]	54,2%	54,2%	51,1%	51,1%	50,6%	50,6%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.24: Principais indicadores – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.25: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções

Fonte: Elaborado pelo autor

Em tais combinações, é possível avaliar os potenciais benefícios que podem ser alcançados com a eletrificação da frota como parte de uma estratégia integrada por parte do planejador do sistema. Como observa-se na Figura 5.24, na presença de intervenções de Engenharia a eletrificação da frota torna-se sutilmente mais benéfica, em comparação a sua implantação isolada, havendo uma leve sinergia entre as medidas. Enquanto a implantação isolada produz benefícios de R\$ 35 mil/dia/10km sobre o Bem Estar Social, tanto no cenário “FU+OE” quanto no cenário “AP+OE”

resultam benefícios incrementais superiores – R\$ 38 mil/dia/10km e R\$ 36 mil/dia/10km, respectivamente.

Na Figura 5.25 é possível notar o padrão que se forma na comparação entre cenários com e sem a intervenção “OE”. As barras vermelhas, pretas e verde-escuras são as que variam, usualmente passando a destacar-se à direita do eixo central em virtude dos ganhos nos cenários “OE” identificados na seção 5.2.2.3. O efeito líquido depende fundamentalmente da magnitude das variações individuais.

Tomando-se como referência de comparação os cenários “FU+OE” e “AP+OE”, há dois efeitos relevantes que se manifestam de forma distinta e cujos efeitos se compensam. Primeiramente, destaca-se que o fato de as velocidades no TCO serem mais baixas no cenário “AP” (em relação ao cenário “FU”) implica emissões unitárias mais elevadas, oferecendo maior potencial de ganho com a eletrificação da frota. Pode-se notar esse resultado na Figura 5.27, na qual o custo por PKM associado às EVP é de 0,023 R\$/PKM (0,020+0,003) no cenário “FU” e 0,028 R\$/PKM (0,025+0,003) no cenário “AP” – convergindo para 0,01 R\$/PKM após a eletrificação da frota em ambos os casos (no Pico; no Fora-Pico o resultado é similar, cf. Figura 5.28).

Adicionalmente, destaca-se que as velocidades mais baixas do cenário “AP” (ainda em relação ao cenário “FU”) aumentam os tempos de ciclo, fazendo com que seja necessária uma frota maior para atendimento das frequências. Quanto maior a frota, mais relevantes tornam-se os custos de aquisição elevados dos veículos elétricos, minorando, assim, o ganho incremental de Bem Estar Social associado ao cenário “AP+OE”. Este efeito domina o descrito no parágrafo anterior (nos cenários simulados), fazendo com que os ganhos associados ao cenário “FU+OE” resultem maiores que os associados ao cenário “AP+OE”.

Figura 5.26: Custos sociais médios no Pico – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.27: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.28: Custos sociais médios no Fora-Pico – Complementaridade entre eletrificação da frota e demais intervenções

Os efeitos descritos também se manifestam no cenário “Base+OE”. Neste caso, os efeitos negativos preponderam, fazendo com que haja benefício incremental sutilmente inferior ao decorrente da implantação da intervenção OE de forma isolada – i.e., R\$ 33 mil/dia/10km, contra R\$ 35 mil/dia/10km na implantação isolada. A dominância dos impactos negativos se deve as baixas velocidades praticadas pelo TCO no cenário Base, i.e., sem que as intervenções de Engenharia promovam melhorias operacionais. Conforme ilustrado pelos resultados da Tabela 5.7 (linhas 13-16), o tempo de ciclo no Pico é de 1,56 horas²⁸ no cenário “Base”, 22% maior que no cenário “AP” e 43% maior que no cenário “FU”.

Outro ponto que vale destaque é que a cobrança ao TIA na configuração ótima resulta menor após a eletrificação da frota (i.e., R\$ 7,98, contra R\$ 8,15 no cenário “Base+CC/S”). Isso indica que é o impacto da eletrificação da frota no cenário Base é tal que passa a ser menos benéfico incentivar a migração modal em favor do TCO. Novamente, destaca-se que isso é fruto do elevado custo de aquisição dos ônibus

²⁸ Dado por $\frac{10}{1/t_{bus,p}} + \frac{10}{1/t_{bus,o}}$, na qual as parcelas representam o tempo de viagem em cada sentido, ao longo dos 10km de via em análise.

elétricos em combinação com as ineficiências operacionais presentes no cenário Base. Este resultado ilustra tanto a relevância de representar adequadamente o desempenho operacional do sistema de TCO em métodos de avaliação de projetos quanto a vantagem das medidas de engenharia sobre medidas de mercado no âmbito da elaboração de estratégias integradas para gestão do sistema de transportes.

5.2.4. Síntese parcial

Na avaliação das intervenções individualmente, o cenário “AP” resultou com os maiores benefícios, em termos de Bem Estar total, apesar de não serem as alternativas mais vantajosas do ponto de vista dos impactos associados às EVP nem do ponto de vista da sinergia com as demais intervenções.

Foi possível notar que a inclusão dos impactos das EVP se mostrou especialmente relevante em alguns contextos (além dos envolvendo a eletrificação da frota), representando aproximadamente 20% das variações de Bem Estar estimadas nos cenários “FU”, gerando impactos quase suficientes para alterar a ordenação dos cenários avaliados, no que diz respeito aos benefícios sociais resultantes. Resultou, ainda, que a eletrificação da frota pode gerar benefícios além das reduções das emissões da EVP.

Analisando-se especificamente o potencial efeito combinado das intervenções, em alusão a estratégias integradas de ação sobre o sistema de transportes, foi possível identificar haver potencial de complementaridade entre as diferentes tipologias de intervenção – tanto do ponto de vista do Bem Estar Social total quanto especificamente do ponto de vista dos impactos das EVP. Destaca-se que ao comparar o cenário “FU+AP” com o cenário “AP”, a introdução de faixa de ultrapassagem promove perdas de Bem Estar Social porém promove ganhos associados aos impactos das EVP, destacando haver uma relevante vantagem característica do modo “TCO” em relação ao modo “TIA” no que diz respeito aos impactos das EVP. Adicionalmente, é possível notar que a eletrificação da frota pode tornar-se mais benéfica em cenários nos quais a operação do TCO seja mais eficiente (ou menos congestionada). Esta característica resulta na presença de complementaridade com leve sinergia entre eletrificação da frota e as intervenções de Engenharia analisadas.

Adicionalmente, foi possível identificar aspectos presentes nos resultados que remetem às motivações da presente pesquisa, aludidas no Capítulo 1. Primeiramente, foi possível notar que a migração modal se configura como um meio relevante para redução das EVP (em termos médios, por PKM). Esse resultado destaca a relevância de que se represente de forma precisa a operação no TCO, de modo a estimar benefícios efetivamente alcançáveis.

Avaliando-se os impactos das faixas de ultrapassagem individualmente por período, foi possível notar que seu impacto líquido foi negativo quando considerando sua implementação especificamente no Fora-Pico (i.e., ao comparar-se o cenário “FU(p+o)” com o cenário “FU(p)”). Nesta comparação, aproximadamente 20% do impacto negativo está associado às EVP. Isso indica que o grau inicial de congestionamento afeta as conclusões de forma relevante – tendo em vista que o Fora-Pico representa um contexto de operação pouco congestionada. Isso indica, adicionalmente, que é relevante analisar-se os diferentes períodos do dia de forma individual, de modo a capturar as influências de cada contexto de operação.

Tendo os resultados apresentados nesta seção (seção 5.2) em vista, foram simulados cenários adicionais e realizadas análises complementares, visando explorar em maior grau de detalhe a possível influência dos fatores descritos nos parágrafos anteriores sobre as conclusões produzidas por métodos de avaliação de projetos – especialmente no que diz respeito à consideração dos impactos associados às EVP. Na sequência deste capítulo são endereçados, portanto, os seguintes tópicos:

- Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento;
- Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento (i.e., Fora-Pico);
- Sensibilidade dos resultados à valoração atribuída aos efeitos das EVP; e
- Relevância da inclusão dos impactos associados às EVP na avaliação de projetos de transportes.

5.3. Análise exploratórias complementares

Nesta seção são explorados, de forma complementar, os tópicos identificados como relevantes para a obtenção de conclusões a partir dos métodos de avaliação. São desenvolvidas análises exploratórias acerca da sensibilidade das conclusões obtidas na seção 5.2 a diferentes aspectos relativos ao contexto de análise e à

estruturação do método de avaliação *per se*. Previamente às análises de sensibilidade, entretanto, apresenta-se uma reflexão sobre a aparente relevância de se contemplar as componentes de custos sociais associadas às EVP na avaliação de projetos de transportes.

5.3.1. Relevância da consideração dos impactos das EVP para a tomada de decisão

Uma das questões subsequentes à introdução de uma dimensão adicional na avaliação econômica de projetos é qual sua relevância para os resultados e para o processo decisório.

Para elucidação acerca desta questão, avaliou-se, primeiramente, a influência de se incluir os impactos das emissões na função de mérito do planejador do sistema – i.e., em termos mais específicos, da inclusão dos impactos associados às EVP no cômputo do Bem Estar Social.

Na Tabela 5.8 são apresentados os resultados dos cenários analisados para fornecer insumos a esta análise. Além dos cenários Base e FU, são apresentadas três variações do cenário “FU + CC/S”, cada uma contendo uma composição distinta para a função de mérito (i.e., Bem Estar Social).

Na nomenclatura dos cenários, o termo “Sem EVP” indica a ausência dos impactos das EVP na função de mérito sendo otimizada. O termo “Apenas GHG” indica a introdução apenas dos efeitos relativos às emissões de GEE. Por fim, o termo “GHG + Saúde” indica a introdução de ambos os efeitos das EVP descritos no Capítulo 4 (emissões de GEE e efeitos sobre a saúde).

Tabela 5.8: Principais resultados – Relevância da consideração dos impactos das EVP para a tomada de decisão

#	Indicador	Base	FU	FU + CC/S (Sem EVP)	FU + CC/S (Apenas GHG)	FU + CC/S (GHG + Saúde)
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Δ Bem estar social [R\$/wd/10km]	0	56.822	231.102	231.248	231.240
1b	Δ Bem estar social* [R\$/wd/10km]	0	46.187	214.543	214.403	214.284
2	Δ Excedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	0	830	214.543	214.403	214.284
3	Δ Operação TCO [R\$/wd/10km]	0	45.357	-225.446	-228.727	-230.273

#	Indicador	Base	FU	FU + CC/S (Sem EVP)	FU + CC/S (Apenas GHG)	FU + CC/S (GHG + Saúde)
4	Δ Cobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	0	225.446	228.727	230.273
5	Δ GHG [R\$/wd/10km]	0	2.583	8.945	9.219	9.333
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	0	8.052	7.614	7.626	7.623
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	0,00	13,77	14,12	14,24
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0,0%	86,4%	87,3%	88%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0,0%	86,4%	87,3%	88%
11	Frequência (p) [#h]	91	117	131	131	131
12	Frequência (o) [#h]	81	87	94	94	94
13	Velocidade (car,p) [km/h]	8,2	6,8	15,5	15,9	16,0
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	11,6	17,3	16,9	16,9	16,9
15	Velocidade (car,o) [km/h]	31,6	22,3	25,1	25,1	25,1
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	16,6	19,4	19,3	19,3	19,3
17	Viajantes no pico [%]	33,9%	34,2%	34,1%	34,1%	34,1%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	43,5%	44,0%	44,1%	44,1%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,3%	21,9%	21,9%	21,9%
20	% Demanda (car,p) [%]	47,4%	33,3%	25,0%	24,7%	24,6%
21	% Demanda (bus,p) [%]	52,6%	66,7%	75,0%	75,3%	75,4%
22	% Demanda (car,o) [%]	49,4%	45,8%	41,8%	41,8%	41,7%
23	% Demanda (bus,o) [%]	50,6%	54,2%	58,2%	58,2%	58,3%

Fonte: Elaborado pelo autor

No comparativo entre os cenários, pode-se notar que a introdução dos impactos das EVP afeta de forma desprezível a decisão do planejador, em termos de quanto subsídio ao TCO e quanta cobrança ao TIA praticar. O valor da CC praticada no Pico cresce 2,5% com a introdução dos impactos das EVP associados aos GEE, crescendo mais 0,8% com a introdução dos impactos das EVP associados à saúde pública. Os subsídios variam ainda menos (1,0% e 0,5%, respectivamente). Adicionalmente, nota-se que o Bem Estar Social permanece aproximadamente constante entre os três cenários. A título de complementação, tal ausência de variações na tomada de

decisão não se manifesta exclusivamente na análise do cenário “FU+CC/S”. A conclusão é similar quando considerada a frota eletrificada (i.e., cenário “FU+OE” e variações análogas do cenário “FU+OE+CC/S”), bem como quando retiradas as restrições de subsídios não-negativos e iguais entre períodos do processo de otimização (restrições apresentadas nas equações (4.77) e (4.78)) – cenários não apresentados em detalhe a fim de tornar a leitura mais contínua .

Entende-se que esta influência limitada sobre os resultados decorra da menor relação entre externalidades associadas às EVP e o grau de congestionamento incidente sobre a operação (em comparação ao atraso, por exemplo). Isso implica que os benefícios decorrentes da redução de congestionamento provocada pelas intervenções são pouco influenciados pela introdução destas componentes dos custos sociais na função de mérito.

Por fim, nota-se que a relevância da introdução das externalidades associadas à emissão de GEE foi superior à de sua contraparte associada aos efeitos sobre a saúde. Tendo em vista que os GEE (associado aos efeitos em escala global) são emitidos predominantemente pelo TIA e que o PM (associado aos efeitos sobre a saúde) é emitido predominantemente pelo TCO, este resultado é esperado, uma vez que o TIA opera sob maior grau de congestionamento (saturação) que o TCO. Com efeito, pode-se dizer que há maior margem para atuação sobre as externalidades associadas aos GEE por meio da redução dos congestionamentos via política de preços – posto que um de seus principais efeitos é a indução da migração modal em favor do TCO.

Em sequência à análise apresentada, explorou-se a relevância das externalidades associadas às EVP para o cômputo do Bem Estar Social. Para tanto, decompôs-se a variável “ Δ Bem Estar Social” em duas componentes: uma contendo apenas os efeitos associados às EVP (ΔSW_{EVP}) e outra contendo os demais efeitos (ΔSW_{-EVP}).

Conforme ilustrado na Figura 5.29²⁹, a razão³⁰ entre os impactos das EVP e a soma das demais parcelas do Bem Estar Social resultou entre 8% e 24% em mais da metade dos casos. Esta razão pode ser interpretada como o potencial erro decorrente de se negligenciar os custos sociais das EVP na avaliação econômica de projetos – sem considerar cenários em que negligenciar os impactos das EVP altere o dimensionamento das intervenções.

Em casos específicos nos quais seja esperado que boa parte dos impactos decorra de reduções de EV, a relevância de se considerar os efeitos locais e globais das EVP é naturalmente superior – tal qual resulta no conjunto de cenários “OE” analisados (índices 10 a 13), que são os únicos nos quais a razão $\frac{|\Delta SW_{EVP}|}{|\Delta SW_{-EVP}|}$ superou 25% (em 3 dos 4 cenários “OE”, sendo o cenário “AP+OE” a exceção).

Figura 5.29: Razão entre parcelas do Bem Estar associadas às EVP e não associadas às EVP

Fonte: Elaborado pelo autor

Em adição à avaliação do potencial erro, convém explorar a existência de correlação entre os impactos decorrentes das EVP e o Bem Estar Social em sua

²⁹ No gráfico, a escala vertical foi truncada em 100% para permitir uma visualização mais clara dos diversos resultados.

³⁰ A razão foi calculada a partir do módulo das duas parcelas, de modo a medir a relação entre a magnitude de cada parcela.

composição mais usual (i.e., não contemplando os impactos das EVP). Isso se faz relevante pois, quanto maior a correlação, menor o potencial de a consideração destes impactos modificar as conclusões no que diz respeito à seleção de projetos e intervenções a serem implementadas.

Na Figura 5.30 é exibida a nuvem de pontos associada aos resultados dos cenários avaliados e discutidos anteriormente neste capítulo, em termos das duas componentes do Bem Estar Social elencadas. Nota-se que a correlação observada é negativa, indicando uma razoável relevância de se contemplar os impactos associados às EVP em avaliações econômicas.

Entende-se que a correlação entre ΔSW_{EVP} e ΔSW_{-EVP} seja perturbada na presença de medidas especificamente dedicadas à redução das EVP (e.g., eletrificação da frota). Com efeito, é possível observar, por meio da Figura 5.31, que ao expurgar os cenários contendo intervenções “OE” da análise, a correlação torna-se positiva e assume valor relevante ($R = 0,47$). Entretanto, destaca-se que na avaliação de um leque diverso de intervenções, em abordagens em que se busque identificar possíveis sinergias e redundâncias entre intervenções e estabelecer estratégias integradas de ação sobre o sistema de transportes, torna-se particularmente relevante a representação específica das externalidades associadas às EVP.

Figura 5.30: Correlação entre parcelas do Bem Estar associadas às EVP e não associadas às EVP

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.31: Correlação entre parcelas do Bem Estar associadas às EVP e não associadas às EVP (expurgando cenários que consideram eletrificação da frota)

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, reitera-se a sensibilidade das conclusões obtidas aos contextos de análise – com destaque ao fato de que no Fora-Pico os custos sociais médios decorrentes das EVP são superiores no modo TCO, em relação ao modo TIA, devido à menor ocupação tipicamente observada nesses períodos. Caso os níveis de ocupação sejam

reduzidos também nos períodos de Pico, a perturbação da relação entre custos sociais médios em cada modo pode motivar a consideração específica dos custos sociais das EVP, a fim de garantir a validade das conclusões obtidas em avaliações de projetos. Destaca-se que um eventual cenário de menor ocupação média (ou menor aproveitamento médio da capacidade) no TCO pode ocorrer (i) organicamente, na ausência de incentivos estruturais ao uso do TCO por parte das administrações públicas; (ii) em segmentos específicos da malha de serviços, como em regiões menos adensadas e nas bacias de captação de uma malha tronco-alimentada, ou; (iii) pontualmente, em contextos específicos como a pandemia de COVID-19 vivenciada desde Março/2020 no país.

Reiterando o apresentado no início da seção, a seguir são exploradas as potenciais influências de características do contexto do problema e do método de avaliação sobre o produto das análises, de modo a elucidar a validade e a transferibilidade sobre as conclusões obtidas.

5.3.2. Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento

A primeira análise de sensibilidade realizada consiste em explorar o impacto de não se avaliar explicitamente períodos de menor carregamento (i.e., no presente modelo, o período de Fora-Pico) sobre as conclusões produzidas pelos métodos de avaliação. Essa análise é conduzida com base nos custos sociais médios, sem manipulações adicionais a partir do modelo, visando maior tratabilidade analítica. Nesta análise, a função de mérito utilizada para avaliação de um dado cenário “A” é dada pelo custo social médio global no respectivo cenário, calculado conforme a equação (5.3). Seu cálculo consiste, basicamente, na média dos custos sociais médios por modo e período, ponderando-se pela demanda associada.

$$\overline{SW}_A = \frac{\sum_{m,h} H_h * L * y_{m,h} * \overline{SW}_{m,h}}{\sum_{m,h} H_h * L * y_{m,h}} = \frac{\sum_{m,h} H_h * y_{m,h} * \overline{SW}_{m,h}}{\sum_{m,h} H_h * y_{m,h}} \quad (5.3)$$

Como alternativa à simulação de Pico e Fora-Pico apresentadas na abordagem do modelo analítico (i.e., abrangendo a totalidade do dia-de-trabalho), considera-se uma abordagem na qual apenas os períodos de maior demanda do dia são simulados explicitamente. Por “períodos de maior demanda”, refere-se aos períodos Pico Manhã

(6h-10h) e Pico Tarde (16h30-20h30) – que, na estrutura do modelo analítico, são representados por 8 horas de Pico e 8 horas de Fora-Pico, posto que cada sentido é representado de forma individual.

Para complementação dos resultados do dia-de-trabalho sem consideração explícita do Fora-Pico, são consideradas duas abordagens alternativas. A primeira consiste em admitir que o impacto médio calculado se aplica ao período não simulado – i.e., se resultar um benefício de 0,05 R\$/PKM no período simulado, projeta-se este benefício para o período não simulado, proporcionalmente à demanda do período não simulado. Esta abordagem para aproximação do resultado é referida por “abordagem otimista” (variável $\widehat{sw}_{A+}$). O cálculo da função de mérito é dado pela equação (5.4) – já considerando que apenas 8 horas de Pico e Fora-Pico são contempladas explicitamente (i.e., $H_p=H_o=8$).

$$\widehat{sw}_{A+} = \frac{\sum_{m,h} 8 * y_{m,h} * \overline{sw}_{m,h}}{\sum_{m,h} 8 * y_{m,h}} \quad (5.4)$$

A abordagem alternativa consiste em considerar que não há variação de custos sociais no período não simulado, de modo que este contribui com o valor “zero” para o cálculo da função de mérito. Esta abordagem para aproximação do resultado é referida por “abordagem conservadora” (variável $\widehat{sw}_{A-}$). Seu cálculo é dado por:

$$\widehat{sw}_{A-} = \frac{\sum_{m,h} 8 * y_{m,h} * \overline{sw}_{m,h}}{\sum_{m,h} H_h * y_{m,h}} \quad (5.5)$$

Os resultados obtidos a partir dos métodos citados são sumarizados na Tabela 5.9. No detalhamento dos resultados, são apresentados os custos sociais médios (variáveis $\overline{sw}, \widehat{sw}$) sob cada abordagem de avaliação. Adicionalmente, são apresentados os resultados relativos especificamente aos impactos das EVP (denotados por $\overline{sw}_{EVP}, \widehat{sw}_{EVP}$) a fim de permitir uma análise mais detalhada – em termos práticos, calculados excluindo-se as componentes relativas ao atraso de $\overline{sw}$.

Tabela 5.9: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU (p)	FU (p+o)	AP	OE
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Viajantes no pico [%]	33,9%	33,0%	34,1%	34,2%	34,5%	33,9%

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU (p)	FU (p+o)	AP	OE
2	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	44,4%	43,7%	43,5%	43,4%	43,8%
3	Não-viajantes [%]	22,3%	22,6%	22,2%	22,3%	22,1%	22,3%
4	% Demanda (car,p) [%]	47,4%	42,9%	33,3%	33,3%	45,8%	47,4%
5	% Demanda (bus,p) [%]	52,6%	57,1%	66,7%	66,7%	54,2%	52,6%
6	% Demanda (car,o) [%]	49,4%	49,4%	49,3%	45,8%	48,9%	49,4%
7	% Demanda (bus,o) [%]	50,6%	50,6%	50,7%	54,2%	51,1%	50,6%
8	$\overline{sw}_{car,p}$ [R\$/PKM]	0,99	0,61	1,23	1,24	0,93	0,99
9	$\overline{sw}_{bus,p}$ [R\$/PKM]	0,32	0,39	0,11	0,11	0,21	0,30
10	$\overline{sw}_{car,o}$ [R\$/PKM]	0,06	0,06	0,05	0,14	0,05	0,06
11	$\overline{sw}_{bus,o}$ [R\$/PKM]	0,10	0,10	0,10	0,06	0,08	0,08
12	$\overline{sw}_A$ [R\$/PKM]	0,32	0,25	0,25	0,27	0,28	0,31
13	$\widehat{sw}_{A+}$ [R\$/PKM]	0,45	0,35	0,35	0,36	0,39	0,44
14	$\widehat{sw}_{A-}$ [R\$/PKM]	0,30	0,22	0,23	0,23	0,25	0,29
15	$\Delta\overline{sw}_A$ [R\$/PKM]	0	-0,070	-0,069	-0,057	-0,046	-0,011
16	$\Delta\widehat{sw}_{A+}$ [R\$/PKM]	0	-0,105	-0,104	-0,098	-0,067	-0,010
17	$\Delta\widehat{sw}_{A-}$ [R\$/PKM]	0	-0,071	-0,068	-0,063	-0,042	-0,007
18	$\overline{sw}_{EVP,car,p}$ [R\$/PKM/100]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
19	$\overline{sw}_{EVP,bus,p}$ [R\$/PKM/100]	3,4	3,4	2,3	2,3	2,8	1,6
20	$\overline{sw}_{EVP,car,o}$ [R\$/PKM/100]	2,8	2,8	2,8	3,6	2,7	2,8
21	$\overline{sw}_{EVP,bus,o}$ [R\$/PKM/100]	4,3	4,3	4,2	3,6	4,0	2,0
22	$\overline{sw}_{EVP,A}$ [R\$/PKM/100]	3,8	3,8	3,3	3,4	3,6	2,7
23	$\widehat{sw}_{EVP,A+}$ [R\$/PKM/100]	4,0	3,9	3,3	3,3	3,7	2,9
24	$\widehat{sw}_{EVP,A-}$ [R\$/PKM/100]	2,6	2,5	2,1	2,2	2,4	1,9
25	$\Delta\overline{sw}_{EVP,A}$ [R\$/PKM/100]	0	-0,04	-0,48	-0,39	-0,26	-1,10
26	$\Delta\widehat{sw}_{EVP,A+}$ [R\$/PKM/100]	0	-0,04	-0,68	-0,62	-0,29	-1,04
27	$\Delta\widehat{sw}_{EVP,A-}$ [R\$/PKM/100]	0	-0,05	-0,44	-0,40	-0,18	-0,68

Fonte: Elaboração do autor

Na tabela apresentada, as linhas 0 a 11 indicam os dados de entrada, relativos à demanda (linhas 0-7) e aos custos sociais médios por modo e período (linhas 8-11) – já apresentados nos gráficos e tabelas da seção 5.2.2 e reproduzidos a fim de tornar a leitura mais contínua. Nas linhas 12-14 são apresentadas as estimativas das funções

de mérito (custos sociais médios globais). Nas linhas 15-17 são apresentadas as variações nas funções de mérito, relativas ao cenário base. Nas linhas 18-27 apresenta-se o análogo ao apresentado nas linhas 8-17, ora considerando-se especificamente os impactos associados às EVP (variáveis com índice “EVP”).

Analisando-se o impacto sobre as estimativas de custo médio social global (linhas 15-17), nota-se que as variações baseadas na “estimativa conservadora” ($\Delta\widehat{sw}_{A-}$) resultam bastante próximas da estimativa original ($\Delta\overline{sw}_A$). A maior acurácia da estimativa conservadora decorre do fato de a maior parte dos ganhos ocorrer no Pico – assim como a parte predominante dos custos incide sobre o Pico. Devido a essa característica, considerar variações nulas nos períodos não simulados torna a abordagem mais precisa – ao passo que extrapolá-las de forma proporcional à demanda, nos períodos não simulados, acarreta em superestimativas dos benefícios.

Exceção é feita ao cenário “OE”, no qual os benefícios consistem exclusivamente de reduções nas EVP no TCO. A referida por “estimativa otimista” ($\Delta\widehat{sw}_{OE+}$) resulta em R\$ -0,010/PKM (bastante próxima da variável $\Delta\overline{sw}_{OE} = -0,011$), ao passo que a referida originalmente por “estimativa conservadora” ($\Delta\widehat{sw}_{OE-}$) resulta aproximadamente 30% inferior a este valor (i.e., R\$ -0,007/PKM). Essa observação remete ao fato de os impactos das EVP serem menos vinculados ao grau de congestionamento (e a variações no grau de congestionamento). Dada tal característica, ignorar o que ocorre nos períodos de menor congestionamento, como feito no cálculo de $\Delta\widehat{sw}_{OE-}$, leva a uma subestimativa dos impactos associados ao cenário “OE”. Dada a identificação desta discrepância, analisou-se em específico os resultados associados aos impactos das EVP – reportados nas linhas 18 a 27.

Nos resultados especificamente associados às EVP, nota-se que não há padrão claro no que diz respeito a qual das estimativas baseadas apenas na simulação dos períodos mais carregados (variáveis $\Delta\widehat{sw}_{EVP,A}$) gera resultados mais próximos dos baseados na estimativa original (variáveis $\Delta\overline{sw}_{EVP,A}$). Antecipa-se que o cenário “Base+CC/S” não fora contemplado nesta análise posto que a variação nos custos sociais médios associados às EVP resultou pouco relevante.

Analisando-se as variações entre cenários resultantes (linhas 25-27), nota-se que as estimativas $\Delta\widehat{sw}_{EVP,A-}$ resultam mais próximas de $\Delta\overline{sw}_{EVP,A}$ nos cenários “FU”, indicando que desconsiderar os impactos no período não simulado torna o resultado

mais preciso. Analisando-se em detalhe as variações custos sociais médios (disponíveis na Figura 5.11 e Figura 5.12 e reproduzidos novamente na Figura 5.32 e Figura 5.33, por conveniência) nos cenários “FU”, nota-se que os impactos incidentes sobre o Fora-Pico não são efetivamente nulos no cenário “FU(p+o)”.

O que ocorre no cenário “FU(p+o)”, de fato, é que se observa ganhos associados às EVP no TCO (i.e., redução de impactos) e perdas, no TIA, devido ao aumento no congestionamento neste modo com a supressão de uma faixa do tráfego geral. Circunstancialmente, isto torna os impactos líquidos associados ao Fora-Pico menos relevantes – sem significar que tais impactos possam sumariamente ser negligenciados.

Figura 5.32: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.33: Custos sociais médios no Fora-Pico – Sensibilidade dos resultados à simulação de períodos de menor carregamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando-se os cenários “AP” e “OE”, observa-se que as estimativas $\Delta \widehat{SW}_{EVP,A+}$ resultam mais próximas de $\Delta \widehat{SW}_{EVP,A}$, indicando novamente que o impacto nos períodos de menor congestionamento não é desprezível. O emprego de $\Delta \widehat{SW}_{EVP,A-}$ (i.e., negligenciando-se os impactos no período de menor carregamento) levaria a subestimativas entre 30% e 40% em ambos os casos (-0,68 e -0,18, comparado a -1,10 e -0,26 no uso de $\Delta \widehat{SW}_{EVP,A}$).

Com efeito, os resultados indicam que a simulação de cenários de menor carregamento é especialmente relevante na análise de impactos associados às EVP, uma vez que tais impactos são menos sensíveis ao grau de congestionamento ao qual a operação do sistema está sujeita.

Nota-se, ainda, que os impactos nos períodos de menor congestionamento nem sempre são correlacionados aos impactos incidentes sobre os períodos de maior congestionamento – representando motivação adicional para a representação específica também dos períodos de menor congestionamento, especialmente tratando-se de avaliações de projetos considerando os impactos associados às EVP.

5.3.3. Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

Para análise da sensibilidade dos resultados e conclusões produzidas ao grau inicial de congestionamento, realizou-se a mesma análise descrita no item 5.2.2 considerando-se uma demanda inicial 30% inferior à demanda do cenário base. Detalhes acerca da geração do respectivo novo cenário base (referido por “cenário base-dr”) com 70% da demanda original são apresentados em Apêndice: J).

Na Tabela 5.10 são apresentados os principais resultados relativos a esta análise de sensibilidade. O sufixo “-dr” no nome dos cenários remete ao fato de se considerar uma demanda reduzida. Destaca-se que as faixas de ultrapassagem naturalmente se mostraram como uma intervenção inadequada neste cenário de menor demanda (i.e., por haver saturação baixa nas paradas de ônibus), gerando perdas de Bem Estar de R\$ 112 mil/wd/10km no cenário “FU-dr(p)” e R\$ 135 mil/wd/10km no cenário “FU-dr(p+o)”. Não obstante tais perdas, observou-se benefícios R\$ 4 mil/wd/10km e R\$ 2 mil/wd/10km, respectivamente, associados aos impactos das EVP, em linha com conclusões anteriores.

Por essa razão, tais cenários foram substituídos pelos cenários “Base+CC” e “Base+S” nas análises apresentadas a seguir – uma vez que, nesta configuração de menor demanda, os subsídios passaram a ser empregados pelo planejador do sistema, como resultado do processo de otimização que emula a tomada de decisão (descrito no item 4.5.5).

Tabela 5.10: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

#	Indicador	Base-dr	Base-dr + CC	Base-dr + S	Base-dr + CC/S	AP-dr	OE-dr
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	244.732	244.732	244.732	244.732	244.732	244.732
1	ΔBem estar social [R\$/wd/10km]	0	36.869	2.674	40.436	27.887	18.293
1b	ΔBem estar social* [R\$/wd/10km]	0	32.067	2.952	36.675	26.514	5.787
2	ΔExcedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	0	-109.874	79.663	34.111	21.451	0
3	ΔOperação TCO [R\$/wd/10km]	0	-3.635	-76.711	-110.652	5.063	5.787
4	ΔCobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	145.577	0	113.216	0	0
5	ΔGHG [R\$/wd/10km]	0	4.604	654	4.996	285	3.517

#	Indicador	Base-dr	Base-dr + CC	Base-dr + S	Base-dr + CC/S	AP-dr	OE-dr
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	0	198	-932	-1.235	1.088	8.989
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	6,60	0,00	5,10	0,00	0,00
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0%	45%	67%	0%	0%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0%	45%	67%	0%	0%
11	Frequência (p) [#h]	52	59	54	61	53	52
12	Frequência (o) [#h]	46	47	49	51	46	46
13	Velocidade (car,p) [km/h]	13,4	19,5	14,0	19,3	13,7	13,4
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	16,4	15,8	16,2	15,7	17,7	16,4
15	Velocidade (car,o) [km/h]	34,3	34,2	34,8	34,9	34,4	34,3
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	18,6	18,6	18,5	18,5	19,3	18,6
17	Viajantes no pico [%]	33,9%	33,0%	34,1%	33,5%	34,1%	33,9%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	44,4%	43,8%	44,3%	43,7%	43,8%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,6%	22,1%	22,2%	22,2%	22,3%
20	% Demanda (car,p) [%]	57,0%	49,7%	55,7%	49,2%	56,4%	57,0%
21	% Demanda (bus,p) [%]	43,0%	50,3%	44,3%	50,8%	43,6%	43,0%
22	% Demanda (car,o) [%]	59,0%	58,9%	56,5%	55,3%	58,7%	59,0%
23	% Demanda (bus,o) [%]	41,0%	41,1%	43,5%	44,7%	41,3%	41,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.34: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.35: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Em comparação ao cenário base (i.e., com os níveis de demanda originais), algumas alterações destacam-se – assim como algumas constâncias destacam-se também. Nota-se, primeiramente, que a participação dos impactos das EVP no custos sociais médios por PKM no cenário Base-dr, no Pico, (cf. Figura 5.36), passou a ser de 9% no TIA e 16% no TCO (contra 5% e 11% no cenário Base, respectivamente). No Fora-Pico (cf. Figura 5.38), passou a ser 66% no TIA e 48% no TCO (contra 50% e 43% no cenário Base, respectivamente).

No que diz respeito à relação entre os modos, o TCO segue apresentando custos sociais médios por PKM menores que o TIA no Pico (R\$ 0,135/PKM, comparado a R\$ 0,520/PKM no TIA, cf. Figura 5.36). Por outro lado, o TIA segue apresentando custos sociais médios inferiores aos do TCO no Fora-Pico (R\$ 0,069/PKM, comparado a R\$ 0,040/PKM no TIA, cf. Figura 5.38), inclusive no que diz respeito especificamente aos custos decorrentes das EVP (R\$ 0,033/PKM, comparado a R\$ 0,026/PKM no TCO). O maior custo social médio por passageiro associado às EVP observado no TCO decorre tanto do menor congestionamento enfrentado pelo TIA quanto pela menor ocupação tipicamente observada nos veículos de TCO nestes períodos.

Finalmente, na configuração de demanda reduzida, destaca-se que o custo social médio no Pico deixou de ser equivalente a 8,1 vezes o custo social médio por PKM do Fora-Pico (i.e., $\frac{\overline{SW_p}}{\overline{SW_o}} = 8,1$, no cenário Base), no cenário Base, e passou a ser 6,7 vezes o do Fora-Pico, no cenário Base-dr – ainda uma discrepância relevante, com os custos associados ao Pico permanecendo amplamente mais significativos. No que diz respeito aos custos sociais médios associados às EVP, um passageiro*quilômetro no Pico passou a custar 1,26 vezes o custo correspondente no Fora-Pico (i.e., $\frac{\overline{SW_{EVP,p}}}{\overline{SW_{EVP,o}}} = 1,26$, no cenário Base-dr). Esta razão corresponde a 1,16, no cenário Base, reiterando a menor variabilidade desta componente dos custos em função do grau de congestionamento.

Figura 5.36: Custos sociais médios no Pico – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.37: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.38: Custos sociais médios no Fora-Pico – Sensibilidade dos resultados ao grau inicial de congestionamento

Fonte: Elaborado pelo autor

No que diz respeito a impactos sobre a variação total no Bem Estar, é possível notar, dentre as intervenções de mercado analisadas, que a CC promove ganhos tanto associados aos impactos das EVP quanto associados às demais componentes. O fato de existir mais capacidade disponível no sistema de transportes, no cenário de demanda reduzida, permite que o cenário “Base-dr + CC/S” passe a ser mais benéfico que o cenário “AP-dr” – o oposto do que se observou nos cenários considerando 100% da demanda do cenário Base. O cenário “Base-dr + CC/S” passa a promover ganhos que superam os proporcionados pelo cenário “AP-dr” em R\$ 13 mil/dia/10km – ou, caso não se considere os impactos associados às EVP, R\$ 10 mil/dia/10km, subestimando os benefícios adicionais em aproximadamente 30% (cf. Tabela 5.10, linhas 1 e 1b).

No cenário “Base-dr + S”, por sua vez, nota-se que o emprego de subsídios – enquanto medida de estímulo à realização de viagens – promove perdas associadas aos impactos das EVP (cf. Tabela 5.10, linhas 5-6), ainda que sutis. Por ser uma medida que incentiva a migração modal em favor do TCO, sua eficácia no âmbito da redução dos impactos das EVP é também condicionada pela eficiência do modo TCO no transporte de passageiros (i.e., em termos de custos sociais médios por PKM).

Com efeito, o fato de o TCO implicar custos médios sociais superiores ao TIA no Fora-Pico limita a eficácia dos subsídios no âmbito da mitigação dos custos associados às EVP – e reitera a relevância de se analisar explicitamente períodos de menor carregamento para a obtenção de avaliações mais acuradas.

No cenário “OE-dr”, contemplando uma intervenção dedicada a redução de EVP e seus impactos, nota-se, de fato, uma redução nos custos sociais associados às EVP superior a R\$ 13 mil/dia (no segmento viário de 10 km). Após considerados os impactos sobre os custos de operação do sistema de TCO, os ganhos líquidos de Bem Estar atingem R\$ 18 mil/dia, superando o cenário “Base-dr + S” e chegando próximo aos demais cenários – alcançando entre 45% e 66% dos ganhos de Bem Estar proporcionados pelas demais alternativas. Nos cenários considerando 100% da demanda, tais valores resultaram entre 25% e 62%. O ganho relativo de atratividade da intervenção OE, ao considerar-se um nível de demanda reduzido, está associado ao ganho de relevância das externalidades associadas às EVP em contextos de menor congestionamento.

Aprofundando-se na comparação entre os cenários Base e Base-dr, depara-se com duas distinções relevantes à avaliação de impacto da eletrificação da frota (em análise análoga à apresentada no item 5.2.3.2): (i) o congestionamento mais intenso enfrentado pelo TCO no cenário Base provoca taxas de emissões unitárias mais elevadas, oferecendo maior potencial de ganho com a eletrificação da frota ao reduzi-las, e; (ii) o mesmo “congestionamento mais intenso enfrentado pelo TCO” reduz a produtividade dos veículos do TCO, em termos de quilômetros percorridos por hora, tornando a operação mais custosa (ao requerer uma frota maior para atendimento das frequências planejadas) e, portanto, fazendo com que os custos de aquisição dos ônibus elétricos provoquem impactos mais significativos. Das análises realizadas, resulta que os benefícios operacionais resultam similares, havendo maior benefício líquido no cenário de maior demanda por haver maior congestionamento no TCO e, portanto, maiores taxas de emissões por VKM (a serem mitigadas com a eletrificação da frota).

5.3.4. Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP

Conforme sumarizado na seção 5.3.1, os custos associados às EVP representaram entre 8% e 24% das variações no Bem Estar Social que seriam obtidas caso os impactos das EVP não fossem considerados na composição do Bem Estar, na maioria dos casos – em outras palavras, representaram 8% a 24% do denotado por “*Bem Estar Social**” na presente dissertação. Trata-se de uma componente do Bem Estar de relevância moderada face as demais.

Notadamente, a valoração dos efeitos decorrentes das EVP (i.e., impactos do efeito-estufa e efeitos sobre a saúde, no presente modelo analítico) tem o efeito de atribuir ponderações a tais efeitos na composição do cálculo do Bem Estar. Na revisão bibliográfica, foi possível identificar razoável heterogeneidade nos parâmetros utilizados para valorar os efeitos finais das EVP, especialmente no que diz respeito aos custos sociais atribuídos à mortalidade prematura ocasionada pela poluição do ar.

Por esta razão, desenvolve-se nesta seção uma exploração acerca da sensibilidade dos resultados obtidos à valoração atribuída aos efeitos finais das EVP. Os valores efetivamente empregados são os apresentados ao final da seção Apêndice: G), baseados em publicações do IPEA (ROCHA et al., 2019) e da ANTP (2018b).

Na Tabela 5.11 são contrastados os valores-base (considerados nas análises apresentadas anteriormente) e os valores considerados nesta análise de sensibilidade, referida por “valoração alternativa”. No caso da valoração atribuída a cada evento de morte prematura, os valores publicados pelo IPEA (ROCHA et al., 2019) referem-se à vida perdida (VV, ou valor da vida), ao passo que a valoração original é atribuída com base nos anos de vida perdidos (VOLY). Por essa razão, a tabela contrasta o VV estimado com o produto $\left(VOLY * \frac{YLL}{evento} \right)$ considerado nas avaliações anteriores.

Tabela 5.11: Valoração dos impactos associados às EVP para análise de sensibilidade

Parâmetro	Valor-base	Valor para análise de sensibilidade	Valor para análise de sensibilidade proporcional ao valor-base
$VOLY * \frac{YLL}{evento}$ ou VV	R\$ 268 mil $\frac{R\$}{evento}$	R\$ 2,17 milhões $\frac{R\$}{evento}$	811%
SCC	195 $\frac{R\$}{ton CO_{2eq}}$	364 $\frac{R\$}{ton CO_{2eq}}$	187%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados diversos – Fontes individuais descritas no item 3.4.2 e em Apêndice: G)c)

Tais valores foram introduzidos na formulação do modelo analítico e então simulou-se novamente os cenários associados à implementação de cada tipologia de intervenção independentemente. Desta forma, os resultados ora apresentados são comparáveis aos expostos na seção 5.2.2.

Na Tabela 5.12, na Figura 5.40 e na Figura 5.42 são apresentados os principais resultados obtidos. Na Figura 5.39 e na Figura 5.41 são reproduzidos os resultados apresentados originalmente na seção 5.2.2, a fim de facilitar sua comparação.

Tabela 5.12: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU (p)	FU (p+o)	AP	OE
0	Demanda Total [pax/wd/10km]	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617	349.617
1	Δ Bem estar social [R\$/wd/10km]	0	58.537	121.679	116.303	185.242	207.008
1b	Δ Bem estar social* [R\$/wd/10km]	0	59.347	54.578	46.187	135.412	5.473
2	Δ Excedente do Consumidor [R\$/wd/10km]	0	-152.806	29.534	830	115.195	0
3	Δ Operação TCO [R\$/wd/10km]	0	-10.230	25.044	45.357	20.217	5.473
4	Δ Cobrança TIA [R\$/wd/10km]	0	222.383	0	0	0	0
5	Δ GHG [R\$/wd/10km]	0	3.798	11.431	4.822	1.636	12.428
6	Δ Mortalidade [R\$/wd/10km]	0	-4.608	55.670	65.294	48.194	189.107
7	Cobrança TIA (p) [R\$/10km]	0,00	8,17	0,00	0,00	0,00	0,00
8	Subsídio TCO (p) [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
9	Cobrança TIA (o) [R\$/10km]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

#	Indicador	Base	Base + CC/S	FU (p)	FU (p+o)	AP	OE
10	Subsídio TCO (o) [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%
11	Frequência (p) [#h]	91	96	116	117	96	91
12	Frequência (o) [#h]	81	83	81	87	82	81
13	Velocidade (car,p) [km/h]	8,2	11,9	6,8	6,8	8,6	8,2
14	Velocidade (bus,p) [km/h]	11,6	10,5	17,3	17,3	14,1	11,6
15	Velocidade (car,o) [km/h]	31,6	31,3	31,7	22,3	31,9	31,6
16	Velocidade (bus,o) [km/h]	16,6	16,6	16,8	19,4	17,8	16,6
17	Viajantes no pico [%]	33,9%	33,0%	34,1%	34,2%	34,5%	33,9%
18	Viajantes no fora-pico [%]	43,8%	44,4%	43,7%	43,5%	43,4%	43,8%
19	Não-viajantes [%]	22,3%	22,6%	22,2%	22,3%	22,1%	22,3%
20	% Demanda (car,p) [%]	47,4%	42,9%	33,3%	33,3%	45,8%	47,4%
21	% Demanda (bus,p) [%]	52,6%	57,1%	66,7%	66,7%	54,2%	52,6%
22	% Demanda (car,o) [%]	49,4%	49,4%	49,3%	45,8%	48,9%	49,4%
23	% Demanda (bus,o) [%]	50,6%	50,6%	50,7%	54,2%	51,1%	50,6%

Fonte: Elaborado pelo autor

Por construção, nota-se que os resultados referentes à operação dos sistemas de transporte não se alteram em relação aos apresentados na Tabela 5.5 (seção 5.2.2). Exceção é feita ao cenário “Base+CC/S”, no qual as características da intervenção (i.e., os valores de cobrança ao TIA e subsídio ao TCO) são definidas com base no que proporciona o ótimo social. Entretanto, resulta que a diferença no valor de CC é desprezível (de R\$ 8,15 no cenário original, para R\$ 8,17, no presente cenário), com o subsídio continuando nulo no ponto de ótimo social.

Este resultado é questionável, uma vez que o custo marginal social se torna amplamente maior com a valoração adotada para os efeitos finais das EVP e a CC é uma medida baseada na imposição de uma cobrança equivalente ao custo marginal social (não-privado). Sob esta ótica, as intervenções de mercado deveriam resultar em cobranças superiores.

Deve-se ter em mente, entretanto, que a CC produz dois efeitos distintos: migração modal e redução da demanda. Tendo em vista que a elasticidade intermodal (associada ao nível inferior do modelo comportamental) é maior que a elasticidade da demanda por viagens no presente modelo (associada ao nível superior do modelo comportamental), a migração modal torna-se o efeito preponderante. Com efeito, se altera o princípio para definição do valor a ser cobrado na política de cobrança por congestionamento, em relação à teoria clássica de internalização dos custos externos, posto que se deve considerar o efeito marginal que a migração modal produz sobre os modos complementares (i.e., no caso do presente modelo, o TCO).

Para melhor ilustrar a argumentação apresentada, foram simulados dois cenários (não apresentados em detalhe) removendo-se as restrições de que o subsídio seja não-negativo (i.e., permitindo aumento de tarifa também no TCO) e constante entre os períodos. Tais cenários são referidos por “Base+CC/S*”. Em um cenário, considerou-se a valoração-base apresentada na Tabela 5.11, ao passo que no outro foram considerados os valores adotados nas análises de sensibilidade à valoração dos efeitos finais das EVP. Os resultados obtidos, em termos de subsídios e cobranças por congestionamento praticados, são resumidos na Tabela 5.11.

Tabela 5.13: Cenário Base+CC/S* - Subsídios e cobranças por congestionamento

Parâmetro	Considerando valoração-base	Considerando valoração para análise de sensibilidade
Cobrança por congestionamento - Pico	R\$ 14,56/viagem	R\$ 16,35/viagem
Subsídio - Pico	-267%	-363%
Cobrança por congestionamento – Fora-Pico	R\$ 0,00/viagem	R\$ 0,00/viagem
Subsídio – Fora-Pico	-4%	-93%

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados diversos – Fontes individuais descritas no item 3.4.2 e em Apêndice: A)c)

Na tabela, valores de subsídio negativos representam acréscimos à tarifa do TCO – e.g., -267% representa aumentar a tarifa em 267%, ou seja, de R\$ 3,80 para R\$ 13,95 (cálculo ilustrado em valores de 2016). Nota-se que ambas as cobranças efetivamente aumentam ao aumentar-se a valoração atribuída aos efeitos finais das EVP. O aumento de cobrança é superior no TCO tendo em vista que o valor atribuído aos efeitos sobre a saúde são os valores que mais aumentam no cenário para análise de sensibilidade, bem como que o TCO é a principal fonte emissora de PM (dentro

TCO e TIA). Feita essa observação sobre o cenário Base+CC/S, retoma-se a análise dos resultados.

Figura 5.39: Principais resultados – Diferentes tipologias de intervenção (com valores-base para efeitos finais das EVP)
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.40: Principais resultados – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.41: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Diferentes tipologias de intervenções (com valores-base para efeitos finais das EVP)

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.42: Variações no Bem Estar Social, relativas ao cenário Base – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP

Fonte: Elaborado pelo autor

Na comparação entre cenários, é possível notar que a intervenção “OE” (eletrificação da frota) é uma das mais afetadas pela mudança da premissa de valoração, amplificando os ganhos proporcionados e tornando-se a mais benéfica em termos de ganhos de Bem Estar Social. Este é um resultado naturalmente esperado.

Em adição a isso, é possível notar que as intervenções de mercado perdem atratividade. Como mencionado, este resultado se deve às restrições impostas à prática de subsídios, obrigando a prática de subsídios não-negativos e idênticos entre

períodos. Destaca-se que tais restrições tem motivação de cunho prático – a título de exemplo, no município de São Paulo efetivamente se pratica tarifas módicas no TCO, dentro de uma política tarifária com motivações sociais, e invariantes ao longo do dia.

As restrições práticas fazem com que se possa alcançar, com intervenções de mercado, apenas configurações usualmente referidas por *second-best* (segundas-melhores, em tradução livre, remetendo a configurações sub-ótimas). Com efeito, as configurações *second-best* afastam as intervenções de mercado de seu princípio de cobrança equivalente ao custo marginal não-privado e acabam por limitar sua efetividade prática.

Destaca-se ainda que a diferença de impactos gerados pelas intervenções “FU” e “AP” é afetada. A intervenção “FU” tem seus benefícios majorados e passa a oferecer ganhos da ordem de 64% dos ganhos proporcionados pela intervenção “AP”. Considerando os valores-base, tal relação era de 40%.

Nos cenários considerando a valoração-base, uma das vantagens da intervenção “FU” na redução dos custos associados às EVP está associada a promoção de maior migração modal em favor do TCO. Sob a valoração alternativa e analisando-se exclusivamente os custos sociais das EVP, é possível notar que o TCO se torna mais custoso que o TIA também no Pico (cf. Figura 5.44). A migração modal deixa de ser uma ferramenta para mitigação dos impactos associados às EVP nesse contexto, portanto – exceto, naturalmente, no cenário de eletrificação da frota.

O fato de a intervenção “FU” promover maiores ganhos em relação ao custo das EVP, em comparação ao cenário “AP” – i.e., ganhos de Bem Estar de R\$ 70 mil (cenário “FU(p+o)”), em comparação a ganhos de R\$ 50 mil no cenário “AP” (cf. Tabela 5.12, linhas 1 e 1b) –, passa a ser decorrente da maior melhoria operacional promovida sobre o TCO no cenário “FU”. É possível notar que a implantação de faixa de ultrapassagem ocasiona ganhos associados aos custos das EVP da ordem de 0,045 R\$/PKM, no Pico, ao passo que o cenário “AP” gera ganhos da ordem de 0,024 R\$/PKM (cf. Figura 5.44).

Nas análises considerando a valoração-base, tais ganhos eram de 0,0095 R\$/PKM e 0,0035 R\$/PKM, respectivamente (i.e., impactos cinco e sete vezes menor, respectivamente). Sob a valoração alternativa, torna-se prioritário (e mais rentável) investir em melhorias operacionais no sistema de TCO. Numa ótica mais ampla, pode-

se dizer que tanto intervenções operacionais, de infraestrutura ou tecnológicas sobre o sistema de TCO passam a ser mais benéficas e justificáveis pelos ganhos sociais proporcionados num contexto de maior valoração aos efeitos finais das EVP.

Figura 5.43: Custos sociais médios no Pico – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.44: Custos sociais médios no Pico (apenas os associados às EVP) – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.45: Custos sociais médios no Fora-Pico – Sensibilidade dos resultados à valoração dos efeitos finais das EVP

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, destaca-se que com no cenário sob a “valoração alternativa”, os custos sociais médios (por PKM) no Fora-Pico correspondem a aproximadamente 30% dos custos sociais médios no Pico (valores referentes ao cenário Base). Analisando-se a composição destes custos sociais médios, é possível notar que os custos associados às EVP correspondem a 42% dos custos sociais médios analisados (valores referentes ao cenário Base e ao agregado do dia-de-trabalho). Para fins de comparação, sob a “valoração-base” tais proporções representam 12%, ambas (resultando iguais por acaso). Isto implica que ao atribuir uma valoração mais elevada aos efeitos finais das EVP, além de implicar que avaliar as externalidades associadas às EVP ganham relevância, contemplar em detalhe os períodos de menor carregamento também passa a ser mais crítico para o processo de avaliação de impacto.

6. CONCLUSÕES

Neste capítulo são sumarizadas as conclusões obtidas com base nos resultados apresentados no Capítulo 5. Os presentes resultados foram gerados com base na metodologia descrita no Capítulo 4, desenvolvida com base nas abordagens para modelagem e avaliação de projetos de transporte exploradas no Capítulo 3 de modo a endereçar fenômenos e intervenções relevantes, sumarizados no Capítulo 2.

O modelo analítico explorado baseia-se em uma representação estilizada da operação de um segmento viário homogêneo de 10 km no qual operam dois modos de transporte: automóveis e ônibus. A demanda é considerada homogeneamente distribuída e seu comportamento é representado segundo um modelo de escolha discreta, de bases microeconômicas, em que a decisão é tomada hierarquizada em duas etapas: na decisão de em que período viajar (permitindo a opção de não viajar) e, definido o período, seguindo para a decisão de qual modo utilizar na viagem (dentre os dois disponíveis). Além da representação dos usuários, o modelo analítico contempla a figura do planejador do sistema, que otimiza o Bem Estar Social (a função de mérito do planejador) com base nas variáveis de decisão disponíveis – sendo o Bem Estar Social também a função de mérito utilizada para avaliação dos cenários simulados.

Os exercícios práticos baseiam-se nas características das avenidas permeadas pelo corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro, um dos corredores de ônibus de maior demanda no Município de São Paulo. Foram analisados cenários baseados em quatro tipologias de intervenção sobre o sistema de transportes: (i) de infraestrutura; (ii) operacionais; (iii) de mercado, e; (iv) tecnológicas. Adicionalmente, foram exploradas configurações alternativas de intervenções, do contexto inicial de análise e da estrutura do método de avaliação, conforme identificado como relevante, a fim de permitir a obtenção de conclusões complementares acerca dos problemas da pesquisa.

Posto que se trata de um tema amplo, após sintetizadas as conclusões obtidas a partir dos exercícios práticos desenvolvidos através do modelo analítico, são também consolidadas recomendações para possíveis trabalhos complementares à presente pesquisa.

6.1. Síntese crítica dos resultados

Nos exercícios realizados a partir do modelo analítico foram explorados dois temas principais: (i) os potenciais impactos de diferentes tipologias de intervenções visando a mitigação dos impactos associados às emissões veiculares de poluentes (EVP) e a decorrente relevância de considerá-los em avaliações de projetos no transporte urbano, e; (ii) a sensibilidade dos resultados e conclusões produzidos a componentes específicas dos métodos de análise e avaliação.

No que diz respeito ao potencial impacto das intervenções, foi possível identificar que a migração modal em favor do transporte coletivo por ônibus (TCO) se apresenta como um instrumento relevante para mitigação dos impactos das EVP. Analogamente, a implementação de melhorias operacionais dedicadas ao TCO também tende a produzir ganhos globais associados às EVP, ao implicar reduções nas emissões unitárias (medidas em g/km).

Quando os fenômenos-meio (i.e., migração modal e melhorias operacionais) são provocados por meio da imposição de prejuízos aos demais modos (i.e., ao TIA, no contexto do modelo analítico), é necessário avaliar especificamente o impacto sobre cada um dos modos para a composição do resultado final, não havendo padrão claro *a priori*. Os exercícios realizados variando-se o nível inicial de demanda (e, logo, de congestionamento) mostraram elevada variabilidade nos impactos de intervenções ambivalentes – como na provisão de faixas exclusivas de ultrapassagem (FU) ao TCO por meio da subtração de faixas originalmente dedicadas ao tráfego geral, ou cenários “FU” –, podendo resultar em prejuízos líquidos, efetivamente. Ainda assim, há elevado potencial de que o resultado líquido em relação aos impactos das EVP seja positivo. Com efeito, notou-se que, mesmo em alguns cenários nos quais a intervenção analisada provocava perdas de Bem Estar (e.g., cenários “FU” sob demanda reduzida em 30%, explorados na seção 5.3.3), ainda foi possível observar benefícios líquidos do ponto de vista dos impactos das EVP, decorrentes da migração modal em favor do TCO proporcionada.

Deve-se destacar que, sob uma ótica dos custos médios associados às EVP, o TCO mostrou-se mais benéfico que o TIA apenas em contextos nos quais os ônibus trafegam com ocupação elevada – podendo esta relação ser invertida em casos em que os veículos do TCO operem com menor ocupação média (ou menor “aproveitamento médio da capacidade”, no termo utilizado na presente dissertação).

Além de evidenciar que a migração modal em favor do TCO tenda a gerar ganhos associados aos impactos das EVP, os resultados obtidos sugerem que a conclusão não é invariável face às características do contexto de análise – tendo em vista que os ganhos ocorrem apenas no Pico e que no Fora-Pico ocorre o oposto. Destaca-se ainda que sem uma representação consistente das condições operacionais (e.g., aproveitamento médio da capacidade) os resultados obtidos podem ser enviesados e distorcidos, se afastando do que é efetivamente alcançável em condições reais de operação.

As conclusões sumarizadas nos parágrafos anteriores são baseadas em avaliações feitas considerando a denominada “valoração-base” para os efeitos finais das EVP (apresentados na Tabela 0.26 e Tabela 0.27 da seção Apêndice: G)) e são sensíveis à valoração adotada. Considerando a valoração empregada nas análises de sensibilidade desenvolvidas na seção 5.3.4 (cf. Tabela 5.11), referidas por “valoração alternativa”, as conclusões são alteradas. Sob a “valoração alternativa”, o modo TCO gera custos sociais médios (por PKM) associados às EVP equivalentes a aproximadamente o dobro (199%) dos custos associados à operação do TIA (151% no Pico e 333% no Fora-Pico) – resultados do cenário Base do modelo analítico.

Neste contexto alternativo de “valoração alternativa”, a migração modal deixou de configurar-se como um instrumento adequado para mitigação dos custos associados às emissões, posto que ao migrar do TIA para o TCO o passageiro passaria a gerar custos sociais associados às EVP mais elevados (por PKM). Por outro lado, investimentos em melhorias operacionais (i.e., intervenções referidas por “Faixa de Ultrapassagem” e “Área Paga” no Capítulo 5) e na eletrificação da frota passam a tornar-se adicionalmente benéficos e, portanto, mais prioritários nesses contextos. Numa ótica mais ampla, pode-se dizer que tanto intervenções operacionais, de infraestrutura ou tecnológicas sobre o sistema de TCO passam a ser mais benéficas e justificáveis pelos ganhos sociais proporcionados num contexto em que se atribui maior valor econômico aos efeitos finais das EVP.

No que diz respeito aos impactos isolados das tipologias de intervenções, a tipologia que se mostrou mais benéfica – em termos de variações de Bem Estar Social total associada à operação do sistema de transportes – foi a que representa intervenções operacionais sobre o TCO. Mais especificamente, trata-se de

intervenções que produzem melhorias operacionais (e.g., redução nos tempos de viagem dos veículos e passageiros) intervindo especificamente sobre elementos do corredor de TCO e sem prejuízo direto aos demais modos – representadas, no modelo analítico, pela implementação de coleta desembarcada de tarifas, denominada “Área Paga” (AP).

Apesar desse resultado, a intervenção AP não foi a que apresentou maior benefício associado especificamente aos impactos das EVP. A intervenção de implementação de faixas de ultrapassagem (FU) exclusivas ao TCO junto a estações para aumento da capacidade das paradas de ônibus, por meio da supressão de uma das faixas de tráfego dedicadas ao tráfego geral – representante da tipologia de intervenções de infraestrutura – foi a intervenção que se mostrou mais benéfica, neste sentido. Em comparação aos impactos da intervenção AP, a intervenção FU promoveu aproximadamente metade (48%) dos ganhos de Bem Estar Social, ao passo que resulta em quase o dobro (191%) dos ganhos associados aos impactos das EVP especificamente. Este resultado indica que a correlação entre impactos associados às EVP e demais impactos relevantes à avaliação não é elevada, ilustrando a relevância de se considerar em específico os efeitos finais das EVP e a maneira como cada intervenção os afeta.

As denominadas intervenções de mercado – baseadas na promoção de cobrança por circulação (*congestion charging*, ou CC) e subsídio adicional (S) – resultaram em impactos moderados sobre o Bem Estar Social, face às demais. Os impactos líquidos sobre os custos sociais das EVP, por sua vez, resultaram praticamente desprezíveis, quando implementadas isoladamente das demais intervenções. Conforme citado na seção 5.3.4, restrições de cunho prático impedem que as intervenções de mercado atinjam todo o potencial previsto pela teoria econômica. Por não afetarem diretamente a produtividade do sistema de transportes, seus ganhos tendem a ser limitados, face a intervenções de Engenharia, e dependentes da disponibilidade de capacidade instalada em sistemas existentes – disponibilidade de capacidade, esta, que raramente se observa em áreas urbanas densas em países em desenvolvimento, como é o caso do Município de São Paulo (MSP). Ainda sobre intervenções de mercado, cabe o destaque de que em cenários considerando sua implementação em conjunto com as demais intervenções, foi observada complementaridade entre os

impactos individuais das intervenções e, em alguns casos, ganhos de efetividade das intervenções de mercado.

Finalmente, a substituição da frota atual por ônibus elétricos³¹ (OE) – representante da quarta e última tipologia de intervenções avaliada, denominadas “intervenções tecnológicas” – mostrou potencial de produzir ganhos não só associados a reduções das EVP, mas também decorrentes de economias nos custos operacionais. Tais benefícios ocorrem não obstante o elevado custo de aquisição dos ônibus elétricos – equivalente a 2,5 vezes o custo de aquisição de veículos a diesel, segundo Cooper et al. (2019) – e tendem a ser majorados à medida que a tecnologia de veículos elétricos for aprimorada e se tornar mais eficiente e de produção menos custosa.

Para fins de ilustração, os benefícios totais gerados pela intervenção OE foram os menores, dentre as intervenções avaliadas, resultando ganhos equivalentes a 25%-62% dos promovidos pelas demais intervenções. Ao considerar-se a “valoração alternativa” (i.e., que majora o valor econômico atribuído aos efeitos finais das EVP), a intervenção OE passa a resultar como a mais benéfica dentre as quatro avaliadas – destacando a elevada influência da valoração dos efeitos finais das EVP sobre as conclusões obtidas.

Analisando-se o potencial efeito combinado das intervenções, em alusão a estratégias integradas de ação sobre o sistema de transportes, foi possível identificar haver potencial de complementaridade entre as diferentes tipologias de intervenção, com exceção da combinação entre as duas intervenções de Engenharia (AP e FU). A complementaridade se manifestou tanto do ponto de vista do Bem Estar Social sem considerar as EVP (variável ΔSW_{-EVP}) quanto especificamente do ponto de vista dos impactos das EVP (variável ΔSW_{EVP}). Entretanto, nem sempre a complementaridade em ambas as dimensões (ΔSW_{EVP} e ΔSW_{-EVP}) se manifestou de forma conjunta – destacando, novamente, a necessidade de se avaliar explicitamente os impactos associados às EVP.

³¹ De tamanho e demais características operacionais idênticas – afetando apenas os parâmetros indicados na seção Apêndice: I).

Nas explorações de cenários combinando diferentes intervenções, reiterou-se o indicativo de como os impactos das EVP são menos dependentes e, portanto, variáveis em função do grau de congestionamento, em comparação às demais componentes do Bem Estar Social, sendo mais influenciados pela divisão modal.

Com efeito, isso implica que a simulação de cenários de menor carregamento é especialmente relevante na análise de impactos associados às EVP, uma vez que tais impactos são menos sensíveis ao grau de congestionamento ao qual a operação do sistema está sujeita. A relevância de simular períodos de menor carregamento é indicada, também, ao explorar os potenciais vieses decorrentes de avaliar-se apenas os impactos nos períodos mais carregados, conforme explorado na seção 5.3.2.

Nas análises apresentadas na referida seção, pôde-se notar que desconsiderar os impactos decorrentes das EVP no período de Fora-Pico gerou desvios da ordem de 30% sobre o resultado relativo ao dia-de-trabalho. Desvios desta ordem de grandeza não se manifestaram quando se considerou o Bem Estar Social total nas análises, indicando que o Bem Estar Social total siga sendo majoritariamente associado ao grau de congestionamento da operação e, logo, afetado de forma moderada pela inclusão dos impactos das EVP em sua composição – ao menos sob a “valoração-base” dos efeitos finais das EVP. Em áreas urbanas, a exposição da população à poluição ocasionada pelos transportes é usualmente maior, assim como as emissões unitárias de poluentes, porém outras parcelas de custos sociais tendem a aumentar também nesses contextos, fazendo com que a relevância relativa dos impactos das EVP não seja necessariamente maior em áreas urbanas.

Além de os impactos especificamente nos períodos de menor congestionamento terem se mostrado relevantes, notou-se ainda que tais impactos nem sempre são correlacionados aos impactos incidentes sobre os períodos de maior congestionamento – reiterando a relevância de se representar especificamente também os períodos de menor congestionamento, especialmente tratando-se de avaliações de projetos considerando os impactos associados às EVP.

No que diz respeito aos impactos em si, os resultados indicam haver potencial para ganhos de R\$ 35 mil a R\$ 143 mil por dia-de-trabalho (i.e., período dos dias úteis entre 06h e 20h30), considerando o impacto isolado de cada tipologia de intervenção dentre as exploradas, para um segmento viário de 10 km de extensão análogo de ao avaliado no modelo analítico. Isto corresponde a impactos entre R\$ 8 milhões e R\$ 35 milhões

de reais por ano³² para uma extensão de 10 km. Considerando que o MSP contenha 120 km de avenidas com corredores de ônibus em configurações similares ao segmento viário estudado (baseado no reportado por BRT CoE+, 2019), isto representa impactos da ordem de R\$ 106 milhões a R\$ 427 milhões por ano intervindo apenas sobre avenidas do município contendo corredores de ônibus com faixas exclusivas. Deste valor, os impactos decorrentes de EVP evitados chegam a representar até R\$ 90 milhões/ano, destacando a relevância dos impactos associados às emissões veiculares de poluentes em eixos viários estruturais da malha de transportes urbanos³³.

6.2. Propostas para pesquisas complementares

Os exercícios práticos realizados foram baseados em representações estilizadas de fenômenos complexos e na análise de um segmento viário homogêneo isolado, inspirado nas características de um eixo viário estrutural do sistema de transporte urbano do Município de São Paulo. Apesar de terem sido realizadas análises sobre a sensibilidade das conclusões obtidas ao contexto de análise e à estrutura do método de avaliação, há uma gama de fatores que podem ser explorados de forma mais abrangente e com maior profundidade, visando promover maior grau de elucidação em relação à relevância dos impactos das EVP enquanto componente dos custos sociais associados à operação de sistemas de transportes.

Na revisão bibliográfica, não foi possível identificar abordagens consolidadas para diversas das etapas envolvidas na avaliação econômica de projetos no âmbito de sistemas de transporte urbano, dada a razoável heterogeneidade observada na literatura de Engenharia de Transportes para representação de fenômenos como dispersões de EVP, exposição à poluentes e dos efeitos finais das EVP e sua valoração. Postula-se que haja, portanto, necessidade e espaço para

³² Considerando um ano contendo 250 dias-de-trabalho e não incluindo os efeitos dias e períodos não abrangidos pelos dias-de-trabalho.

³³ Os resultados apresentados neste parágrafo referem-se aos cenários abordados na seção 5.2.2.

amadurecimento do conhecimento relacionado, especialmente no que diz respeito ao estado-da-prática dos métodos de avaliação de projetos de transportes.

Por tratar-se de um escopo multidisciplinar, envolvendo aspectos de áreas diversas como os relativos a tecnologias veiculares, ciências atmosféricas e saúde pública, por exemplo – além dos temas contemplados pela Engenharia de Transportes e Economia de Transportes em si –, identificou-se uma carência, também, na integração de cada componente dos métodos de avaliação dentro de um enfoque sistêmico e compatível com aplicações na escala usual dos problemas de transporte urbano (i.e., manchas urbanas com milhares ou milhões de habitantes e transeuntes).

Por fim, entende-se serem justificáveis esforços direcionados a compreender os principais fatores relevantes para que se obtenha resultados precisos e consistentes com a realidade por meio do emprego de métodos para modelagem e avaliação de projetos de transportes, com foco em abordagens compatíveis com os problemas e as características da realidade brasileira – e latino-americana, num sentido mais amplo, dadas as peculiaridades comuns da região no emprego dos ônibus em seus sistemas de transporte urbano. Entende-se estar em curso uma rápida evolução do conhecimento associado às EVP e seus impactos, provenientes das áreas de conhecimento específicas de cada componente do problema, sendo justificável um esforço exploratório para integrar a produção acadêmica de setores complementares ao da Engenharia de Transportes, de modo a permitir que planejadores de transportes e formadores de políticas públicas possam orientar-se de forma eficaz e efetiva no endereçamento de problemas do setor em um nível executivo de atuação.

REFERÊNCIAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. **User and non-user benefits analysis for highways**. EUA: [s.n.], 2010.
- ABE, K. C.; MIRAGLIA, S. G. E. K. **Health Impact Assessment of Air Pollution in São Paulo, Brazil**. Em: *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11;13. Suíça: MDPI, 2016.
- ABRANTES, P. A. L.; WARDMAN, M. R. **Meta-analysis of UK values of travel time: An update**. Em: *Transportation Research Part A*, 45, pp. 1-17. Holanda: Elsevier, 2011.
- AKÇELIK, R.; SMIT, R.; BESLEY, M. **Recalibration of a vehicle power model for fuel and emission estimation and its effects on assessment of alternative intersection treatments**. Em: *4th International Roundabout Conference, Transportation Research Board*. EUA: [s.n.], 2014.
- ALAM, M. S.; PERUGU, H.; MCNABOLA, A. **A comparison of route-choice navigation across air pollution exposure, CO2 emission and traditional travel cost factors**. Em: *Transportation Research Part D*, 65, pp. 82-100. Holanda: Elsevier, 2018.
- ANDRADE, M. F.; KUMAR, P.; FREITAS, E. D.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, J.; MARTINS, L.; NOGUEIRA, T.; PEREZ-MARTINEZ, P.; MIRANDA, R. M.; ALBUQUERQUE, T.; GONÇALVES, F. L. T.; OYAMA, B.; ZHANG, Y. **Air quality in the megacity of Sao Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives**. Em: *Atmospheric Environment*, 159, pp. 66-82. Holanda: Elsevier, 2017.
- ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público – Simob/ANTP: Relatório Geral 2016**. São Paulo: [s.n.], 2018a.
- ANTP – Associação Nacional de Transportes Públicos. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público – Simob/ANTP: Nova metodologia adotada para o Simob/ANTP**. São Paulo: [s.n.], 2018b.
- AMIRGHOLY, M.; GONZALES, E. J. **Efficient frontier of route choice for modeling the equilibrium under travel time variability with heterogeneous traveler preferences**. Em: *Economics of Transportation*, 11-12, pp. 1-14. Holanda: Elsevier, 2017.
- BASSO, L. J.; GUEVARA, C. A.; GSCHWENDER, A.; FUSTER, M. **Congestion pricing, transit subsidies and dedicated bus lanes: Efficient and practical solutions to congestion**. Em: *Transport Policy*, 18, pp. 676-684. Holanda: Elsevier, 2011.

BASSO, L. J.; JARA-DIAZ, S. R. **Integrating congestion pricing, transit subsidies and mode choice**. Em: *Transportation Research Part A*, 46, pp. 890-900. Holanda: Elsevier, 2014.

BASSO, L. J.; FERES, F.; SILVA, H. E. **The efficiency of bus rapid transit (BRT) systems: A dynamic congestion approach**. Em: *Transportation Research Part B*, 127, pp. 47-71. Holanda: Elsevier, 2019.

BEN-AKIVA, M. E. **Structure of passenger travel demand models**. PhD Thesis – Massachusetts Institute of Technology. EUA: [s.n.], 1973.

BEN-AKIVA, M. E.; GAO, S.; WEI, Z.; WEN, Y. **A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks**. Em: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, pp 62-82. Holanda: Elsevier, 2012.

BIGAZZI, A. Y.; FIGLIOZZI, M. A. **Congestion and emissions mitigation: A comparison of capacity, demand, and vehicle based strategies**. Em: *Transportation Research Part D*, 17, pp. 538-547. Holanda: Elsevier, 2012.

BIGAZZI, A. Y.; FIGLIOZZI, M. A. **Marginal costs of freeway traffic congestion with on-road pollution exposure externality**. Em: *Transportation Research Part A*, 57, pp. 12-24. Holanda: Elsevier, 2013.

BRANCO, G. M.; WALSH, M. **Controle da poluição dos veículos a diesel – Uma estratégia para o progresso no Brasil**. São Paulo: Fundação Hewlett, 2005

BRT+ CoE. **Global BRT Data (em colaboração com EMBARQ, ITDP e WRI Brasil)**. Disponível em: <<http://brtdata.org>>. Consultado em 03 de Março de 2019.

CAPPIELLO, A. **Modelling traffic flow emissions**. 2002. Masters Dissertation – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology. EUA.

CASCETTA, E. **Transportation System Analysis – Models and Applications (2nd Edition)**. EUA: Springer, 2007.

CASTRO, C. F. C. **Avaliação de fatores intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus**. 2008. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

CET-SP – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. **Boletim Técnico 09: COMONOR – Comboio de ônibus ordenados (Coordinated bus convoy – Special issue in english)**. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/65447/bt09-%20comboio%20de%20onibus%20ordenados.pdf>>. São Paulo: [s.n.], 1978.

CET-SP – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. **Coletiva sobre faixas exclusivas à direita (Apresentação de apoio - Outubro, 2013)**. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/255662/300kmexclusivas1.pdf>>. São Paulo: [s.n.], 2013.

CET-SP – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. **Boletim Técnico 58: Pesquisa de satisfação: Implantação de faixas exclusivas e corredores de ônibus – Ar-condicionado e Wi-Fi nos ônibus da cidade de São Paulo.** Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/494892/boletim-tecnico-58-final-2.pdf>>. São Paulo: [s.n.], 2016.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Teores de material particulado fino, grosso, inalável e total na atmosfera da Grande São Paulo.** São Paulo: [s.n.], 1998.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2015.** São Paulo: [s.n.], 2015.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões veiculares no Estado de São Paulo – 2018.** São Paulo: [s.n.], 2018a.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2018.** São Paulo: [s.n.], 2018b.

COASE, R. H. **The problem of social cost.** Em: *Journal of Law and Economics*, 3, pp. 1-44. EUA: University of Chicago Press, 1960.

COMEAP – Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. **The mortality effects of long-term exposure to particulate air pollution in the United Kingdom.** Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/comeap-mortality-effects-of-long-term-exposure-to-particulate-air-pollution-in-the-uk>>. Reino Unido: [s.n.], 2010.

COOPER, E.; KENNEY, E.; VELASQUEZ, J. M.; LI, X.; TUN, T. H. **Costs and Emissions Appraisal Tool for Transit Buses. Technical Note.** Disponível em: <www.wri.org/publication/transit-buses-tool>. EUA: World Resources Institute (WRI), 2019.

CUI, M.; LEVINSON, D. **Internal and External Costs of Motor Vehicle Pollution.** Em: *Transportation Research Record*, pp 1-14. Reino Unido: Sage, 2020.

DENG, T.; NELSON, J. D. **Recent developments in Bus Rapid Transit: a review of the literature.** Em: *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 31, pp. 69-96. Reino Unido: Taylor & Francis Group, 2011.

DfT – Department for Transport. **Transport Appraisal Guidance (TAG) – Unit A3: Environment Impact Appraisal.** Em: <<https://www.gov.uk/government/publications/tag-unit-a3-environmental-impact-appraisal>>. Reino Unido: [s.n.], 2019.

DIRKS, K. N.; JOHNS, M. D.; HAY, J. E.; STURMAN, A. P. **A simple semi-empirical model for predicting missing carbon monoxide concentrations.** Em: *Atmospheric Environment*, 36, pp. 5953-5959. Holanda: Elsevier, 2002.

DONS, E.; POPPEL, M. V.; PANIS, L. I.; DE PRINS, S.; BERGHMANS, P.; KOPPEN, G.; MATHEEUSSEN, C. **Land use regression models as a tool for short, medium and long term exposure to traffic related air pollution**. Em: *Science of the Total Environment*, 476-477, pp. 378-386. Holanda: Elsevier, 2014.

DPETM-SP – Diretoria de Planejamento e Expansão dos Transportes Metropolitanos de São Paulo. **Pesquisa de mobilidade da região metropolitana de São Paulo – Síntese das informações**. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/metro/arquivos/mobilidade-2012/relatorio-sintese-pesquisa-mobilidade-2012.pdf>. São Paulo: [s.n.], 2013

EBTU – Empresa Brasileira de Transportes Urbanos. **Tratamento preferencial ao transporte coletivo por ônibus**. Brasil: [s.n.], 1983.

EEA – European Environmental Agency. **Air pollutant emission inventory guidebook 2009 – Part B: sectoral guidance chapters – Volume 1.A.3.b**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>. União Europeia: [s.n.], 2009.

EEA – European Environmental Agency. **Air pollutant emission inventory guidebook 2019 – Part B: sectoral guidance chapters – Volume 1.A.3.b**. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>. União Europeia: [s.n.], 2019.

FERNÁNDEZ, R. A.; VALENZUELA, E. F.; GALVÉZ, T. D. **Incorporación de la capacidad y rendimiento de paraderos en el programa TRANSYT**. Em: *Anais do XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transportes*, pp. 221-233. Gramado: [s.n.], 2002.

FHWA – Federal Highway Administration. **Traffic analysis toolbox volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software**. EUA: [s.n.], 2004.

GARDNER, G.; CORNWELL, P. R.; CRACKNEL, J. A. **The performance of busway transit in developing cities**. Research Report 329, TRRL – Transport and Road Research Laboratory. Reino Unido: Crowthorne, 1991.

GIVONI, M. **Re-assessing the results of the london congestion charging scheme**. Em: *Urban Studies*, 49, pp. 1089-1105. Reino Unido: Sage, 2011.

GONZALES, E. J.; DAGANZO, C. F. **Morning commute with competing modes and distributed demand: User equilibrium, system optimum, and pricing**. Em: *Transportation Research Part B: Methodological*, 46 (10), pp. 1519-1534. Holanda: Elsevier, 2012.

GREENSHIELDS, B. D. **The photographic method of studying traffic behavior**. Em: *Proceedings of the 13th annual meeting of the highway research board*, pp 382–399. EUA: 1934.

GUEVARA, A. G.; VALDES, E.; DAVILA, J. **Urban transportation system optimum: The effect of accounting for the interaction of buses and cars**. Em: *Ingeniería y Desarrollo*, 29. Colômbia: Universidad del Norte, 2011.

HATZOPOULOU, M.; MILLER, E. J. **Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's contribution to air pollution in Toronto.** Em: *Transportation Research Part D*, 15, pp. 315-325. Holanda: Elsevier, 2010.

HEI – Health Effects Institute. **Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects.** HEI Special Report 17, Health Effects Institute. Disponível em: <<https://www.healtheffects.org/publication/traffic-related-air-pollution-critical-review-literature-emissions-exposure-and-health>>. EUA: [s.n.], 2010.

HIGHWAYS AGENCY, The. **Design Manual for Roads and Bridges – Volume 11: Environmental Assessment – Section 3: Environmental Assessment Techniques – Part I – HA 207/07.** Reino Unido: [s.n.], 2007.

HOLLANDER, Y.; LIU, R. **The principles of calibrating traffic microsimulation models.** Em: *Transportation* 35(3), pp 347-362. EUA: Springer, 2008.

HUNT, A.; FERGUSON, J.; HURLEY, F.; SEARL, A. **Social Costs of Morbidity Impacts of Air Pollution.** Em: *OECD Environment Working Papers – No. 99.* Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/social-costs-of-morbidity-impacts-of-air-pollution_5jm55j7cq0lv-en>. França: OECD Publishing, 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tábua completa de mortalidade para o Brasil – 2017: Breve análise da evolução da mortalidade no Brasil.** Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Expectativa de vida dos brasileiros aumenta para 76,3 anos em 2018.** Disponível em: <<https://censo2020.ibge.gov.br/2012-agencia-de-noticias/noticias/26103-expectativa-de-vida-dos-brasileiros-aumenta-para-76-3-anos-em-2018.html>>. Consultado em 05 de outubro de 2020.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Estudos sobre Faixas Exclusivas – São Paulo/SP.** São Paulo: [s.n.], 2017.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Inventário de emissões do transporte rodoviário de passageiros em São Paulo.** Disponível em: <<http://emissoes.energiaeambiente.org.br>>. Consultado em 23 de fevereiro de 2019.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Monitor de Ônibus – SP.** Disponível em: <<http://energiaeambiente.org.br/onibus-sp>>. Consultado em 01 de outubro de 2020.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: **Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change** [Stocker, T.F.; D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Reino Unido: Cambridge University Press, 2013.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: **Climate Change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change** [Edenhofer, O.; R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Reino Unido: Cambridge University Press, 2014.

ITDP – Institute for Transportation and Development Policy. **Manual de Bus Rapid Transit – Guia de Planejamento**. Disponível em: <<https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/1.-Manual-de-BRT-em-Portuguese-Guia-de-Planejamento.pdf>>. EUA: [s.n.], 2008.

ITDP – Institute for Transportation and Development Policy. **The BRT Standard**. Disponível em: <<https://www.itdp.org/2016/06/21/the-brt-standard/>>. EUA: [s.n.], 2016.

ITDP – Institute for Transportation and Development Policy. **The BRT Planning Guide**. Disponível em: <<https://brtguide.itdp.org/>>. EUA: [s.n.], 2017.

IWC-SCC – Interagency Working Group on Social Cost of Carbon. **Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866**. EUA: [s.n.], 2013.

JANSSON, J. O. **A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size**. Em: *Journal of Transport Economics and Policy*, 31, pp. 117-146. Reino Unido: University of Bath, 1980.

JARA-DIAZ, S. R.; GSCHWENDER, A. **Towards a general microeconomic model for the operation of public transport**. Em: *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, 23, pp. 453-469. Reino Unido: Taylor & Francis Group, 2003.

JAVID, R. J.; NEJAT, A.; HAYHOE, K. **Quantifying the environmental impacts of increasing high occupancy vehicle lanes in the United States**. Em: *Transportation Research Part D*, 56, pp. 155-174. Holanda: Elsevier, 2017.

KARNER, A.A.; EISINGER, D.S.; NIEMEIER, D.A. **Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data**. Em: *Environmental Science & Technology* 44. EUA: ACS Publications, 2010.

KICKHÖFER, B.; KERN, J. **Pricing local emission exposure of road traffic: An agent-based approach**. Em: *Transportation Research Part D*, 37, pp. 14-28. Holanda: Elsevier, 2015.

KONISHI, H.; MUN, S. **Carpooling and congestion pricing: HOV and HOT lanes**. Em: *Regional Science and Urban Economics*, 40, pp. 173-186. Holanda: Elsevier, 2010.

LENTS, J.; NIKKILA, N.; OSSES, M. E DAVIS, N. **São Paulo vehicle activity study**. EUA: International Sustainable Systems Research Center (ISSRC), 2004

MACEDO, I. C. **Quantificação da redução de danos climáticos decorrente de processos para mitigação das emissões de gee, como subsídio para a avaliação de políticas públicas.** Campinas: Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – UNICAMP, 2014.

MARTINS, L. C.; LATORRE, M. L. D. O.; CARDOSO, M. R. A.; GONÇALVES, F. L. T.; SALDIVA, pp. H. N. e BRAGA, A. L. F. **Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil.** Em *Revista de Saúde Pública*. São Paulo: [s.n.], 2002.

MAYERES, I.; OCHELEN, S.; PROOST, S. **The marginal external costs of urban transport.** Em: *Transportation Research Part D*, 1, pp. 111-130. Holanda: Elsevier, 1996.

MEIRELLES, A. **A review of bus priority Systems in Brazil: from bus lanes to busway transit.** Em: *Smart Urban Transport Conference – Session 2: International Developments*. Austrália: [s.n.], 2000.

METRÔ-SP – Companhia do Metropolitano de São Paulo. **Resultados finais da pesquisa origem-destino 2017.** Disponível em: < <http://www.metro.sp.gov.br/pesquisa-od/>>. São Paulo: [s.n.], 2017.

MILLER, T. **Variations between countries in values of statistical life.** Em: *Journal of Transport Economics and Policy*, 34, pp. 169-188. Reino Unido: University of Bath, 2000

MIRAGLIA, S. G. E. K.; SALDIVA, pp. H.; BÖHM, G. M. **An evaluation of air pollution health impacts and costs in São Paulo, Brazil.** Em: *Environmental Management*, 35, pp. 667-676. Alemanha: Springer, 2005.

MIRAGLIA, S. G. E. K.; GOUVEIA, N. **Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras.** Em *Revista Ciência e Saúde Coletiva*, Vol. 19, no. 10. Rio de Janeiro: SciELO, 2014.

MOHRING, H. **Optimization and Scale Economies in Urban Bus Transportation.** Em: *American Economic Review*, 62 (4), pp. 591-604. EUA: American Economic Association, 1972.

MOTTA, R. S.; MENDES, A. P. F. **Custos de saúde associados à poluição do ar no Brasil.** Rio de Janeiro: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 1994.

MOTTA, R. S. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais.** Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997.

MURCHLAND, J. D. **Braess' Paradox of Traffic Flow.** Em: *Transportation Research*, 4 (4), pp. 391-394. Holanda: Elsevier, 1970.

NANDURI, K. **Mitigating emissions and energy consumption for urban transportation networks: simulation-based signal control strategies.** 2013. Masters Dissertation – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology. EUA.

OLIVA, pp. **Environmental regulations and corruption: automobile emissions in Mexico City**. Em: *Journal of Political Economy*, vol. 123, no. 3. EUA: University of Chicago Press, 2015

ORTUZAR, J. D. e WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4th edition. Reino Unido: Wiley, 2011.

OSORIO, C.; NANDURI, K. **Urban transportation emissions mitigation: Coupling high-resolution vehicular emissions and traffic models for traffic signal optimization**. Em: *Transportation Research Part B*, 81, pp. 520-538. Holanda: Elsevier, 2015.

OSSES, M. **Base year emissions measurement, monitoring, inventories and links to public awareness**. CAI-LAC 2006 - Clean Air Initiative for Latin American Cities. São Paulo: [s.n.], 2006.

O'DISCROLL, R.; APSIMON, H. M.; OXLEY, T.; MOLDEN, N.; STETTLER, M. E. J.; THIYAGARAJAH, A. **A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NO_x and primary NO₂ emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors**. Em: *Atmospheric Environment*, 145, pp. 81-91. Holanda: Elsevier, 2016.

PANIS, L. I.; BROEKX, S.; LIU, R. **Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits**. In *Science of the Total Environment*, No. 371, Holanda: Elsevier, 2006.

PARK, S.; LEE, J.; LEE, C. **State-of-the-art automobile emissions models and applications in North America and Europe for sustainable transportation**. Em: *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20, pp. 1053-1065. Coréia do Sul: Korean Society of Civil Engineers, 2016.

PASCAL, M.; CORSO, M.; CHANEL, O.; DECLERCQ, C.; BADALONI, C.; CESARONI, G.; HENSCHER, S.; MEISTER, K.; HALUZA, D.; MARTIN-OLMEDO, P.; MEDINA, S. **Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom project**. Em: *Science of the Total Environment*, 449, pp. 390-400. Holanda: Elsevier, 2013.

PIETRANTONIO, H. **Modelos normativos em transportes urbanos: aplicação ao projeto de redes de TPCR/UP**. 1997. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Transportes, EPUSP. São Paulo, Brasil.

PIGOU, A. **The economics of Welfare**. Reino Unido: Mmcmillian, 1920.

POPE, C. A.; BURNETT, R. T.; THURSTON, G. D.; THUN, M. J.; CALLE, E. E.; KREWSKI, D.; GODLESKI, J. J. **Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease**. Em: *Circulation*, 109, p. 71-77. EUA: Lippincott Williams & Wilkins, 2004.

POPE, C. A.; COLEMAN, N.; POND, Z. A.; BURNETT, R. T. **Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies**. Em: *Environmental Research*. Holanda: Elsevier, 2019.

PRUD'HOMME, R.; BOCAREJO, J. P. **The London congestion charge: a tentative economic appraisal.** Em: *Transport Policy*, 12, pp. 279-287. Holanda: Elsevier, 2005.

RAKHA, H.; AHN, K.; TRANI, A. **Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions.** Em: *Transportation Research Part D, Vol 9*, p 49-74. Holanda: Elsevier, 2004.

RIBEIRO, A. G. **Câncer e poluição do ar relacionada ao tráfego veicular no município de São Paulo: análise espacial em pequenas áreas.** 2018. Tese de Doutorado – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil.

RICARDO-AEA. **Update of the handbook on external costs of transport – Final Report.** *Report for the European Commission: DG MOVE.* União Europeia: [s.n.], 2014.

ROCHA, G.; MORAIS, R. L.; KLUG, L. **O custo econômico da poluição do ar: estimativa de valor da vida estatística para o Brasil.** Em: *Texto para discussão 2517.* Disponível em: < https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2517_web.pdf >. Rio de Janeiro: IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019.

RODRIGUES, C. G.; VORMITTAG, E. M. P. A.; CAVALCANTE, J. A. e SALDIVA, P. H. N. **Projeção da mortalidade e internações hospitalares na rede pública de saúde atribuíveis à poluição atmosférica no Estado de São Paulo entre 2012 e 2030.** Em *Revista Brasileira de Estudos de População*, Vol. 32, no. 3. São Paulo: SciELO, 2015.

SALDIVA, P. H. N.; KING, M.; DELMONTE, V. L. C.; MACCHIONE, M.; PARADA, M. A. C.; DALIBERTO, M. L.; SAKAE, R. S.; CRIADO, P. M. P.; SILVEIRA, P. L. P.; ZIN, W. A e BÖHM, G. M. **Respiratory alterations due to urban air pollution: An experimental study in rats.** Em *Environmental Research*, Volume 57, Issue 1, pp. 19-33. Holanda: Elsevier, 2006.

SANTOS, G.; BEHRENDT, H.; MACONI, L.; SHIRVANI, T.; TEYTELBOYM, A. **Part I: Externalities and economic policies in road transport.** Em: *Research in Transport Economics*, 28, pp. 2-45. Holanda: Elsevier, 2010.

SHEFFI, Y. DAGANZO, C. F. **Another “paradox” of traffic flow.** Em: *Transportation Research*, 12 (1), pp. 43-46. Holanda: Elsevier, 1978.

SILVA, C. B. P.; SALDIVA, P. H. N.; AMATO-LOURENÇO, L. F.; RODRIGUES-SILVA, F.; MIRAGLIA, S. G. E. K. **Evaluation of the air quality benefits of the subway system in São Paulo, Brazil.** Em: *Journal of Environmental Management*, 101, pp. 191-196. Holanda: Elsevier, 2012.

SPTTrans – São Paulo Transporte S.A. **Banco de dados contendo dados operacionais relativos ao corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro nos dias 17 a 19 de setembro de 2019.** Por: [mensagem por meio de canal público de atendimento ao cidadão]. Mensagem e conteúdo recebidos por: <vinicius.bp@outlook.com> em 21 de outubro de 2020.

SPTrans – São Paulo Transporte S.A. **Planilha Tarifária do Sistema de Transporte Coletivo Urbano – Tarifa R\$ 3,80 – Publicada em 30/12/2015**. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/acesso_a_informacao/index.php?p=150849. São Paulo, [s.n.], 2015.

SMIT, R. **Development and performance of a new vehicle emissions and fuel consumption software (PΔP) with a high resolution in time and space**. Em: *Atmospheric Pollution Research, Vol 4, p 336-345*. Holanda: Elsevier, 2013.

STERN, A. C.; BOUBEL, R. W.; TURNER, D. B.; FOX, D. L. **Fundamentals of Air Pollution, 2nd ed.** EUA: Academic Press, 1984.

SZÁSZ, P. A. **Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas: Manual normativo – Tomo V: Manual de operación de transporte público**. México: SEDESOL – Secretaría de Desarrollo Social, 1995.

TANG, D.; WANG, C.; NIE, J.; CHEN, R.; NIU, Q.; KAN, H.; CHEN, B.; PERERA, F.; Taiyuan CDC. **Health benefits of improving air quality in Taiyuan, China**. Em: *Environment International, 73, pp. 235-242*. Holanda: Elsevier, 2014.

TIETGE, U.; MOCK, P.; FRANCO, V.; ZACHAROF, N. **From laboratory to road: Modeling the divergence between official and realworld fuel consumption and CO₂ emission values in the German passenger car market for the years 2001–2014**. Em: *Energy Policy, 103, pp. 212-222*. Holanda: Elsevier, 2017.

TIRACHINI, A.; HENSHER D. A.; JARA-DIAZ, S. R. **Comparing operator and users costs of light rail, heavy rail and bus rapid transit over a radial public transport network**. Em: *Research in Transportation Economics, 29, pp. 231-242*. Holanda: Elsevier, 2010.

TRB – Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual 1985**. EUA: [s.n.], 1985.

TRB – Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual 1994**. EUA: [s.n.], 1994.

TRB – Transportation Research Board. **Highway Capacity Manual 1997**. EUA: [s.n.], 1997.

TRB – Transportation Research Board. **Transit Capacity and Quality of Service Manual – 2nd Edition**. EUA: [s.n.], 2003.

TRB – Transportation Research Board. **Dynamic Traffic Assignment – A Primer**. Transportation Research Circular E-C153, EUA: [s.n.], 2011.

TURNER, D. B. **Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling**. CRC Press. Flórida, EUA, 1994.

UN – United Nations. **Adoption of the Paris agreement. Conference of the Parties – Twenty-first session**. França: [s.n.], 2015.

VAN WAGENINGEN-KESSELS, F.; VAN LINT, H.; VUIK, K.; HOOGENDOORN, S. **Genealogy of traffic flow models**. Em: *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Volume 4, Issue 4, pp 445–473. Alemanha: [s.n], 2015.

VARDOULAKIS, S.; CHALABI, Z.; FLETCHER, T.; GRUNDY, C.; LEONARDI, G. S. **Impact and uncertainty of a traffic management intervention: Population exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons**. Em: *Science of the Total Environment*, 394, pp. 244-251. Holanda: Elsevier, 2008.

VASCONCELLOS, E. A.; LIMA, I. M. O. **Quantificação das deseconomias do transporte urbano: Uma resenha das experiências internacionais**. Brasília: IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas, 1998.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte e Meio Ambiente: Conceitos e informações para análise de impactos**. São Paulo: Editora do Autor, 2006.

VERHOEF, E. **External effects and social costs of road transport**. Em: *Transportation Research A*, 28, pp. 273-287. Holanda: Elsevier, 1994.

VERHOEF, E.; NIJKAMP, P.; RIETVELD, P. **Tradeable permits: their potential in the regulation of road transport externalities**. Em: *Environment and Planning B: Planning and Design*. Reino Unido: Sage, 1997.

VICKREY, W. S. **Pricing in urban and suburban transport**. Em: *The American Economic Review*, 53, pp. 452-465. EUA: American Economic Association, 1963.

VORMITAAG, E. M. P. A.; RODRIGUES, C. G.; ANDRÉ, P. A.; SALDIVA, P. H. **Assessment and Valuation of Public Health Impacts from Gradual Biodiesel Implementation in the Transport Energy Matrix in Brazil**. Em: *Aerosol and Air Quality Research*, 18, pp. 2375-2382. Taiwan: Taiwan Association of Aerosol Research, 2018.

VTPI – Victoria Transport Policy Institute. **Transportation Cost and Benefit Analysis II – Cost Summary and Analysis**. Disponível em: < www.vtpi.org/tca/tca06.pdf >. Canada: [s.n], 2009.

VUCHIC, V.R. **Urban Transit: Operations, Planning and Economics**. EUA: John Wiley & Sons, 2005.

WANG, J. Y. T.; E., MATTHIAS, E.; DIRKS, K. N.; GUPTA, A. **A bilevel multi-objective road pricing model for economic, environmental and health sustainability**. Em: *Transportation Research Procedia*, 3, pp. 393-402. Holanda: Elsevier, 2014.

WANG, W.; WANG, D. Z. W.; ZHANG, F.; SUN, H.; ZHANG, W.; WU, J. **Overcoming the Downs-Thomson Paradox by transit subsidy policies**. Em: *Transportation Research Part A*, 95, 126-147. Holanda: Elsevier, 2017.

WARDROP, J. **Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research**. Em: *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II*, 1, pp. 325-378. Reino Unido: [s.n.], 1952.

WHO - World Health Organization. **WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment.** Suíça: [s.n.], 2006.

WHO - World Health Organization. **Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project: Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide.** Suíça: [s.n.], 2013.

WHO - World Health Organization. **Burden of disease from household air pollution for 2012.** Suíça: [s.n.], 2014.

WINNER, D. A.; CASS, G. R.; HARLEY, R. A. **Effect of alternative boundary conditions on predicted ozone control strategy performance: a case study in the Los Angeles area.** Em: *Atmospheric Environmental*, Vol. 29, Issue 23. Holanda: Elsevier, 1995.

ZHANG, L.; YIN, Y.; CHEN, S. **Robust signal timing optimization with environmental concerns.** Em: *Transportation Research Part C*, 29, pp. 55-71. Holanda: Elsevier, 2013.

ZHANG, K.; BATTERMAN, S. **Air pollution and health risks due to vehicle traffic.** Em: *Science of the Total Environment*, 450-451, pp. 307-316. Holanda: Elsevier, 2013.

APÊNDICE: IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ANALÍTICO E CÁLCULOS COMPLEMENTARES

Como complemento à apresentação do modelo analítico desenvolvida no Capítulo 4, apresenta-se neste apêndice os valores dos parâmetros tais quais empregados no modelo analítico e os aspectos práticos relativos a sua aplicação no modelo – juntamente da fundamentação associada.

Os valores utilizados, quando referentes a aspectos operacionais ou relativos a níveis de demanda, são baseados no denominado “cenário de referência”, descrito no item 4.1.3 – i.e., as avenidas Eusébio Matoso, Rebouças e Consolação e o trecho do corredor de ônibus Campo Limpo-Rebouças-Centro (doravante referido por “corredor Rebouças”) contido na avenida, na Zona Oeste do Município de São Paulo, no ano de 2017. O procedimento para obtenção dos valores visou, a partir de abordagens expeditas, fornecer parâmetros consistentes com os fenômenos de interesse para a elaboração do modelo analítico.

Destaca-se que os valores monetários foram todos atualizados para 2017, ano considerado para o cenário de referência, a partir dos índices de inflação publicados pela OCDE³⁴ (2020). Foram utilizadas as variações nos índices de preços nacionais, para custos baseados no contexto nacional, e nos preços da união europeia, para custos baseados em parâmetros internacionais e transferidos para o contexto nacional (e.g., custo social do carbono, valor do ano de vida perdido). Os índices anuais de variação são apresentados na Tabela 0.1.

Tabela 0.1: Variações nos índices de preços ao consumidor (em janeiro, nos últimos 12 meses)

Ano	Índice - Brasil	Índice – União Europeia (EU28)
2013	106,2%	102,1%
2014	105,6%	100,9%
2015	107,1%	99,5%
2016	110,7%	100,3%
2017	105,4%	101,7%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados publicados por OCDE (2020)

³⁴ Consultado em <https://data.oecd.org/price/inflation-cpi.htm>, em 01/09/2020.

A sequência do apêndice é dividida em partes que seguem a estrutura lógica utilizada para definição dos parâmetros, estando alinhada à itemização empregada no Capítulo 4 para descrição do modelo analítico.

A) Parâmetros para representação da operação do sistema de transportes

O ponto de partida para representação da operação dos sistemas de transporte foi a representação do desempenho das vias. Em seguida, é descrita a operação associada às paradas de embarque e desembarque. Destaca-se que em virtude do cenário decorrente da pandemia de COVID-19 vivenciada no país desde o primeiro trimestre de 2020, as abordagens apresentadas baseiam-se exclusivamente em dados secundários disponíveis em literatura.

a) Parâmetros das funções de desempenho das faixas de tráfego

A via do segmento homogêneo representado contém quatro faixas de tráfego, das quais uma é de uso exclusivo ao TCO. A velocidade regulamentada no trecho viário analisado, no cenário de referência, é de 50 km/h, porém sabe-se que a presença de semáforos ocasiona atrasos regulares que não permitem que sejam desempenhadas velocidades médias próximas deste limite, mesmo em situações de fluxo livre.

Para aferição do impacto médio dos semáforos no tempo de viagem a partir de dados observados, tomou-se como referência o desempenho dos ônibus em segmentos com e sem a presença de semáforos. Isso se deve ao fato de haver medidas de velocidade mais desagregadas espacialmente para os ônibus, referentes ao segmento viário analisado no cenário de referência – coletados e publicados por Wakai e Hortellani (2017). Com efeito, tomar-se o corredor de ônibus como referência permite ainda minimizar interferências de variações no número de faixas, de interações entre correntes de tráfego distintas e de gargalos do sistema viário sobre os resultados obtidos – e, posto que as medidas distinguem tempo em deslocamento de tempo em paradas para embarque e desembarque, as medidas de velocidade de percurso não sofrem influência da operação junto aos pontos de parada.

Foram analisadas as velocidades médias praticadas no sentido Bairro-Centro (BC) pelos ônibus entre pontos de parada, comparando-se os resultados em trechos com e sem a presença de semáforos, a partir dos dados coletados por Wakai e Hortellani (2017). Os dados disponíveis na referida publicação são relativos ao período Tarde e,

por essa razão, tomou-se o sentido BC como referência – isto é, o sentido não-dominante no período analisado, de modo a evitar influências de congestionamentos sobre as velocidades medidas. Destaca-se que há apenas um segmento sem semáforos entre paradas: o trecho entre Parada Eldorado e Parada Faria Lima, no qual a velocidade de percurso foi a mais elevada, de fato.

Os resultados indicam que, em média, as velocidades são 50% inferiores em trechos contendo semáforos. A comparação considera a velocidade no trecho supracitado e a mediana das velocidades médias nos demais trechos (com presença de semáforos). Destaca-se que os segmentos com semáforos possuem, em média, 5 semáforos por quilômetro (WAKAI e HORTELLANI, 2017). Os valores são apresentados na Tabela 0.2.

Tabela 0.2: Mediana das velocidades médias em cada grupo de trechos – Ônibus – Pico Tarde

Segmentos com semáforos - Mediana (km/h)	Segmentos sem semáforos - Mediana (km/h)	Redução de velocidade (%)
16,0	32,1	50,3%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por Wakai e Hortellani (2017)

Atribuindo-se tal diferença aos semáforos e considerando a elevada intensidade de semáforos no segmento em análise, adotou-se para os ônibus uma velocidade de fluxo livre equivalente a 50,3% da velocidade máxima regulamentada, considerando a presença de semáforos: 24,8 km/h. Para os automóveis, dado que este segmento usualmente sofre menos com atrasos regulares por se beneficiar mais da coordenação semaforica que o modo ônibus – que tem o aproveitamento afetado pelas paradas para embarque e desembarque –, admitiu-se que o impacto de redução seria 50% do impacto atribuído aos ônibus. Este cálculo (i.e., 50,3% * 50%) resulta em 25,2% de redução na velocidade, correspondente a uma velocidade de fluxo livre de 37,4 km/h. As velocidades mencionadas e seus respectivos valores são sumarizadas na Tabela 0.3:

Tabela 0.3: Velocidades de fluxo livre adotadas

Velocidade Máxima Regulamentada (km/h)	Velocidade de fluxo livre – ônibus (km/h)	Velocidade de fluxo livre – automóveis (km/h)
50,0	24,8	37,4

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por Wakai e Hortellani (2017)

A capacidade viária das faixas de tráfego, por sua vez, foi caracterizada com base nos tempos de ciclo e de verde reportados por Wakai e Hortellani para interseções

específicas das avenidas em análise. O tempo de ciclo reportado foi de 128 segundos e os tempos de verde reportados foram de 73 segundos e 85 segundos. Adotou-se o tempo de verde crítico (i.e., o menor valor relativo ao tempo de ciclo) para cálculo da capacidade média das faixas de tráfego ao longo do corredor, considerando uma capacidade básica por faixa de 2000 pcu/h/faixa. A capacidade média por faixa efetivamente adotada é apresentada na Tabela 0.4 e foi adotada tanto para as faixas exclusivas ao TCO quanto para faixas de tráfego geral.

Tabela 0.4: Capacidade média por faixa de tráfego adotada

Capacidade básica por faixa (cpu/h/faixa)	Razão entre tempo de verde médio e tempo de ciclo (%)	Capacidade média por faixa (cpu/h/faixa)
2000	57%	1141

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por Wakai e Hortellani (2017)

Considerações complementares em relação às funções de desempenho (i.e., funções de fluxo-demora) das faixas de tráfego são apresentadas no item subsequente, juntamente de considerações iniciais sobre a demanda por viagens. Entretanto, antes de prosseguir, em adição ao desempenho das faixas de tráfego em função de sua saturação, convém abordar a descrição (em termos matemáticos) da operação em paradas de ônibus.

b) Parâmetros das funções de desempenho para manobras de embarque e desembarque

Primeiramente, o tempo morto ($\tau_{boa/ali,0}$) foi fixado em 14 segundos, com base no exposto no estudo de Fernández et al. (2002), no qual indicam uma parcela fixa de 14 segundos por parada para embarque e desembarque. Tal valor está dentro da faixa de valores indicada na revisão feita por Basso e Silva (2014).

No que diz respeito às manobras de embarque e desembarque, seu cálculo se dá com base no fluxo de passageiros embarcando, assumindo o embarque como manobra dominante, conforme descrito no item 4.3.1.2.1. No presente modelo, admite-se um tempo unitário de embarque ($u\tau_{board}$) de 2,5 segundos por passageiro (BASSO e SILVA, 2014; SZASZ, 1995).

Finalmente, com base nas informações reunidas por Wakai e Hortellani (2017) – que reportam uma extensão de 5,5 km entre as paradas Eldorado e Caio Prado, compreendendo 10 pontos, incluindo ambos os citados –, admite-se que o corredor de ônibus do segmento homogêneo representado no modelo analítico possui um

espaçamento de 0,61 km entre paradas. O espaçamento é mantido inalterado durante os exercícios desenvolvidos com base no modelo analítico. A equação (0.1) reproduz a equação (4.5), ora com os parâmetros substituídos pelos respectivos valores:

$$t_{boa/ali} = 14 * \frac{1}{0,61} + 2,5 * \frac{y_{bus,h}}{10 * f_{bus,h}} \quad (0.1)$$

c) Parâmetros das funções de atraso em paradas de ônibus

A formulação apresentada no item 4.3.1.2.2 para cálculo do atraso por quilômetro requer que se faça a somatória dos atrasos em cada parada. Para fins de cálculo, baseando-se nas circunstâncias encontradas no corredor Rebouças ao longo nas avenidas Eusébio Matoso, Rebouças e Consolação, considera-se que 50% das estações localizam-se adjacentes a um semáforo a jusante e as demais localizam-se suficientemente distantes de semáforos, de modo a não terem sua capacidade afetada. Com efeito, o tempo em fila por quilômetro passa a ser dado por:

$$t_{stop,h} = p_{cor} * \frac{1}{2} * \left[\frac{\chi_{stop,h}^2}{(1 - \chi_{stop,h})} * \frac{1}{f_{bus,h}} + \frac{\chi_{stop,ns,h}^2}{(1 - \chi_{stop,ns,h})} * \frac{1}{f_{bus,h}} \right] \quad (0.2)$$

Na equação (0.2), o termo entre colchetes refere-se à soma dos atrasos por parada, para as duas configurações de paradas consideradas no item 4.3.1.2.2 – que, multiplicados pelo termo “ $\frac{1}{2}$ ”, torna-se o atraso médio nas paradas, tendo em vista que metade das paradas enquadra-se em cada configuração. O termo p_{cor} , por sua vez, transfere a parametrização de atraso/parada para atraso/quilômetro, ao multiplicar o atraso médio por parada pela quantidade de paradas por quilômetro (i.e., equivalente a dividir o atraso por parada pelo espaçamento entre paradas, ou seja, 0,61 km).

B) Parâmetros para representação da demanda – cenário de referência e período Pico

As análises referentes à representação da demanda baseiam-se, especificamente, no tráfego de veículos e passageiros ao longo da seção apresentada (junto à Parada Eldorado do Corredor Rebouças) na Figura 0.1, na configuração apresentada, no sentido Centro-Bairro (i.e., CB, ou Leste-Oeste).

Figura 0.1: Corredor Campo Limpo-Rebouças – Parada Eldorado (sem faixa de ultrapassagem, em 2017)

Fonte: Google Earth (imagem), com anotações do autor

A primeira atividade referente à representação da demanda consiste em um esforço para definição dos parâmetros da função de fluxo-demora (cuja estrutura é apresentada na equação (4.4) e reproduzida na equação (0.3)) a ser empregada na representação da operação das faixas da avenida em análise. Esta atividade é descrita juntamente da representação da demanda devido às interações entre demanda e desempenho do sistema viário que foram contempladas nas análises descritas ao longo deste item, tornando conveniente discorrer sobre os temas de forma conjunta.

$$t = t_0 * [1 + \alpha * (X)^\beta] \quad (0.3)$$

No período Manhã, no sentido CB, a CET-SP (2017) reportou um tráfego médio de 3.143 automóveis/h nas três faixas de rolamento (i.e., 1.048 automóveis/h/fx), além de um volume desprezível de caminhões, motocicletas e bicicletas – além dos ônibus, que utilizam predominantemente as faixas exclusivas junto ao centro da avenida. Considerando se tratar do sentido de contra-fluxo (i.e., não-dominante) do período Manhã, admitiu-se que não havia presença de congestionamento quando da realização destas medições, de modo que o fluxo de tráfego medido seja correspondente à demanda no segmento.

A velocidade média dos automóveis no período Manhã (07h-10h, nas medições da CET-SP, 2017), no sentido CB, foi de 23,9 km/h (CET-SP, 2017) ao longo das avenidas da Consolação, Rebouças e Eusébio Matoso. Com os dados apresentados, foi possível estimar a saturação das faixas de tráfego geral, correspondente ao fluxo de automóveis reportado, considerando a capacidade por faixa apresentada no item anterior. Adotando-se o valor de $\beta = 4$, conforme tipicamente sugerido – e também adotado por Basso e Silva (2014) –, foi possível estimar o parâmetro α da equação e, assim, determinar a função de fluxo-demora, conforme descrito a seguir:

$$\frac{1}{23,9} = \frac{1}{37,4} * \left[1 + \alpha * \left(\frac{1048}{1141} \right)^4 \right] \Rightarrow \alpha = 0,79 \quad (0.4)$$

Admitindo-se que o período Tarde (17h-20h, nas medições da CET-SP, 2017) opera com congestionamentos no sentido Centro-Bairro, não é adequado tomar as medições de fluxo veicular como equivalentes à demanda, de modo que se estima a demanda por meio das medições de velocidade apresentadas pela CET-SP (2017) para o período. Baseando-se na velocidade reportada de 8,2 km/h e na curva de fluxo-demora estabelecida (equação (0.5)), estimou-se o grau de saturação correspondente à velocidade observada e, assim, a demanda associada. A demanda estimada para o período de pico da avenida neste sentido, em automóveis/h, resultou em 1662 automóveis/h/fx nas três faixas de tráfego geral, conforme descrito matematicamente a seguir:

$$t = \frac{1}{37,4} * \left[1 + 0,79 * \left(\frac{x}{1141} \right)^4 \right] \quad (0.5)$$

$$\frac{1}{8,2} = \frac{1}{37,4} * \left[1 + 0,79 * \left(\frac{x}{1141} \right)^4 \right] \Rightarrow x = 1662 \frac{pcu}{h * fx} \quad (0.6)$$

Nas passagens anteriores, estabeleceu-se a demanda no período Tarde, no sentido Centro-Bairro, bem como a função de fluxo-demora para representar a operação das faixas de tráfego ao longo do segmento viário em análise.

A partir deste momento, os cálculos apresentados consideram a premissa simplificadora adotada no modelo analítico de que os sentidos não-dominantes dos

períodos de pico (i.e., Pico Manhã e Pico Tarde, ou apenas Manhã e Tarde³⁵) são equivalentes, em termos de demanda e de operação, ao período Entrepico – não sendo feita distinção entre os sentidos de circulação no Entrepico. Reitera-se a terminologia empregada no modelo analítico para referir-se aos períodos representados, que passará a ser seguida neste apêndice: os períodos Pico referem-se aos sentidos dominantes (i.e., de maior demanda) dos períodos Manhã (6h-10h) e Tarde (16h30-20h30), ao passo que os períodos Fora-Pico referem-se aos sentidos não-dominantes dos períodos Manhã e Tarde, bem como a ambos os sentidos do período Entrepico (10h00-16h30).

Tabela 0.5: Correlação entre períodos do dia e períodos de simulação

Período do dia	Abrangência³⁶	Sentidos de circulação	Período representante, no modelo analítico
Manhã	06h00 – 10h00	Dominante (Bairro-Centro / BC)	Pico
Manhã	06h00 – 10h00	Não-Dominante (Centro-Bairro / CB)	Fora-Pico
Entrepico	10h00 – 16h30	Ambos	Fora-Pico
Tarde	16h30 – 20h30	Não-Dominante (Bairro-Centro / BC)	Fora-Pico
Tarde	16h30 – 20h30	Dominante (Centro-Bairro / CB)	Pico

Fonte: Elaborado pelo autor

O objetivo dos próximos passos apresentados é estabelecer a demanda em cada período e cada modo (tanto em termos de veículos quanto em termos de passageiros) e, para isso, faz-se uma exploração expedita acerca das características da demanda no cenário de referência. Primeiramente, explorou-se a relação entre demanda média em cada um dos períodos (i.e., Pico e Fora-Pico) com base em resultados da Pesquisa Origem-Destino da RMSP, publicada pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ-SP, 2017) – doravante referida por OD-RMSP. Destaca-se que, por simplicidade, nas análises apresentadas a seguir não foram feitos filtros espaciais sobre o banco de dados, tendo sido considerados todo o conjunto de dados coletados sobre a RMSP.

³⁵ Nas referências aos períodos tradicionalmente referidos por “Pico Manhã” e “Pico Tarde”, passa a se utilizar apenas os termos “Manhã” e “Tarde” deste ponto da dissertação em diante, visando evitar confusões de terminologia entre tais períodos e o período “Pico” tal qual considerado no modelo analítico.

³⁶ Exceto quando explicitamente indicado diferentemente.

Analisando-se especificamente a demanda nos modos de transporte público coletivo e de transporte privado por automóvel, obteve-se que são realizadas, em média, 1,75 milhões de viagens/hora no agregado dos períodos Manhã e Tarde; e, no Entrepico, 1,15 milhões de viagens/hora. Considerando que cada sentido de circulação é equivalente no Entrepico, isso corresponde a 0,58 milhões de viagens/hora/sentido. Considerando os sentidos não-dominantes dos períodos Manhã e Tarde como equivalentes aos sentidos do Entrepico, os 1,75 milhões de viagens/hora nos períodos Manhã e Tarde são decompostos em 0,58 milhões de viagens/hora nos sentidos não-dominantes e 1,17 milhões de viagens/hora nos sentidos dominantes. Tais resultados são sumarizados na Tabela 0.6, apresentando resultados também em termos dos períodos considerados no modelo analítico.

Tabela 0.6: Demanda média horária por período – RMSP

Períodos Manhã e Tarde (viagens/h)	Período Entrepico (viagens/h)	Período “Pico” (viagens/h/sentido)	Período “Fora-Pico” (viagens/h/sentido)
1,75 milhões	1,15 milhões	1,17 milhões	0,58 milhões

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por Metrô-SP (2017)

Como resultado, a demanda por hora no Fora-Pico corresponde a 49% da demanda no Pico, no considerado no modelo analítico – relação representada pelo termo “ $\varphi_{\frac{o}{p}Y}$ ”, que no modelo analítico representa o desbalanceamento da demanda entre os sentidos nos períodos de pico. Os resultados individuais por modo não se distanciam do valor agregado (47% e 51% para transporte público coletivo e transporte privado por automóvel), porém nota-se que a demanda no correspondente ao Fora-Pico cai menos no transporte privado por automóvel, em comparação ao transporte público coletivo. Isto indica uma potencial diferença na divisão modal entre os períodos Pico e Fora-Pico. Mais adiante descreve-se como este aspecto foi introduzido no modelo analítico.

Para conversão das medidas de demanda e fluxo veicular em suas medidas correspondentes em passageiros, foram analisadas as ocupações médias dos automóveis nos períodos Pico e Fora-Pico a partir dos dados da OD-RMSP. A ocupação média nos períodos Manhã/Tarde resultou em 1,44 pax/automóvel, ao passo que no período Entrepico resultou em 1,51. Considerando que o resultado relativo aos períodos Manhã/Tarde contém a influência dos sentidos não-dominantes – mais especificamente, tratando-se de uma média das ocupações de cada sentido,

ponderadas pelas respectivas demandas –, buscou expurgar este efeito considerando que a ocupação dos sentidos não-dominantes seria equivalente à do período Entrepico. A abordagem para tanto baseia-se na proporção $\frac{\varphi_o}{p}$ e é descrita pela equação a seguir:

$$1,44 = \frac{1 * a_{car,p} + \frac{\varphi_o}{p} * a_{car,o}}{1 + \frac{\varphi_o}{p}} = \frac{a_{car,p} + 0,49 * 1,51}{1 + 0,49} \Rightarrow a_{car,p} = 1,41 \quad (0.7)$$

No que diz respeito à ocupação média dos veículos do TCO, foram analisadas informações operacionais compiladas pela SPTrans (2020, referentes aos dias 17-19/Setembro/2019) sobre frequências e ocupações estimadas em rotas que operam ao longo do Corredor Rebouças. Foram avaliadas as ocupações médias em cada período e sentido ao longo das avenidas Eusébio Matoso, Rebouças e Consolação. Os resultados são resumidos na Tabela 0.7. Destaca-se que foram consideradas apenas linhas que atendem ao menos 7 das 10 paradas situadas ao longo do referido segmento do corredor, em ambos os sentidos, e uma ocupação de projeto de 4 pax/m² nas áreas para passageiros em pé. Além disso, foram expurgadas da análise as linhas que atendem o campus Cidade Universitária da Universidade de São Paulo por apresentarem perfis de carregamento atípicos, naturalmente, quando comparadas com as demais rotas que operam no corredor.

Tabela 0.7: Ocupações médias ao longo de rotas ao longo do Corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro – trecho Eusébio Matoso-Consolação

Rota	Manhã (BC)	Manhã (CB)	Entrepico (BC)	Entrepico (CB)	Tarde (BC)	Tarde (CB)
7458-10	38,8%	32,4%	21,5%	37,9%	22,8%	87,8%
7545-10	50,1%	23,2%	28,9%	33,0%	35,2%	66,8%
778R-10	51,2%	25,5%	27,3%	32,4%	38,8%	65,4%
7903-10	54,0%	18,0%	27,1%	29,2%	29,4%	51,1%
8700-10	44,3%	21,1%	24,3%	29,2%	24,4%	45,5%
8705-10	34,8%	19,3%	19,2%	19,1%	39,6%	47,2%
8707-10	50,8%	24,4%	26,7%	26,2%	30,8%	57,0%
Mediana	50,1%	23,2%	26,7%	29,2%	30,8%	57,0%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por SPTrans (2020)

Na Tabela 0.7, os referidos períodos abrangem apenas as horas completas contidas nas durações originais dos mesmos, uma vez que as informações produzidas pela SPTrans (2020) são agregadas por hora – e.g., o período Tarde, originalmente abrangendo das 16h30-20h30 no modelo, abrange o período das 17h00 às 20h00 na

referida tabela. Dentre os resultados, nota-se que as ocupações no Entrepico de fato resultam em patamares similares aos dos sentidos não-dominantes dos períodos Manhã e Tarde, comparando-se a mediana das ocupações dos serviços. Comparando a mediana das ocupações dos períodos/sentidos representados pelo Fora-Pico (no modelo) e com a mediana das ocupações nos sentidos dominantes dos períodos de pico (representados pelo Pico, no modelo), obtém-se que a ocupação reduz em 47%. Em outras palavras, a ocupação média no Fora-Pico representa 53% da ocupação média no Pico ($\varphi_{\overline{p},load}^o = 53\%$).

A ocupação dos veículos no Pico, por sua vez, resultou relativamente baixa – 51%, tomando-se mediana das medidas individuais de ocupações de ambos os sentidos dominantes conjuntamente. Entende-se que isso se deva à recente inauguração (em 2018) de um terminal de ônibus integrado a uma nova estação de metrô, parte integrante de um corredor metroviário com traçado paralelo ao do corredor Rebouças, fazendo com que o trecho do corredor Rebouças contido no segmento em análise tenha sofrido reduções em sua ocupação veicular média, em relação ao cenário de referência (em 2017). Tendo isso em vista, analisou-se a ocupação média nos sentidos dominantes no segmento do corredor imediatamente anterior ao terminal inaugurado (i.e., entre as paradas Chácara do Jockey e Jorge João Saad). As ocupações observadas nos sentidos dominantes das linhas que percorrem o trecho são apresentadas na Tabela 0.8.

Tabela 0.8: Ocupações médias ao longo de rotas ao longo do Corredor Campo Limpo-Rebouças-Centro – trecho Chácara do Jockey-Terminal Morumbi

Rota	Manhã (BC)	Tarde (CB)
8075-10	67,7%	89,3%
8075-21	71,6%	66,4%
809P-10	65,5%	100,6%
857A-10	89,9%	91,3%
857P-10	84,6%	89,8%
857R-10	88,6%	81,1%
8605-10	86,2%	96,3%
8700-10	76,6%	76,8%
Mediana	80,6%	89,5%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por SPTrans (2020)

Nesta segunda análise, nota-se que a mediana das ocupações dos sentidos dominantes dos períodos Manhã e Tarde resultaram em 85,4%. Este foi o valor de

ocupação média considerado para fins de cálculo nos períodos Pico (variável $load_{p,avg}$) – resultando em uma ocupação média no Fora-Pico de:

$$load_{o,avg} = load_{p,avg} * \varphi_{\frac{o}{p},load} = 85,4\% * 53\% = 45,3\%$$

De posse da estimativa de ocupação no sentido crítico, é possível obter a estimativa da demanda na seção transversal representada na Figura 0.1. Os valores de demanda obtidos são sumarizados na Tabela 0.9. É apresentada, também, a divisão modal resultante das estimativas feitas. Destaca-se que as estimativas de demanda no TCO consideram que o corredor opera com a frota composta igualmente por ônibus padron (13m) e articulados (23m), com capacidade de 68 pax/veículo e 132 pax/veículo, respectivamente, levando a uma capacidade média de 100 pax/veículo no modelo analítico. No que diz respeito ao fluxo de ônibus, tomou-se como referência a média das medidas fornecidas pela CET-SP (2017) para o referido corredor³⁷, resultando em 91 ônibus/hora.

Tabela 0.9: Estimativas de demanda na seção junto à Parada Eldorado do Corredor Rebouças, no sentido Centro-Bairro, no cenário de referência

Informação	Fonte Primária	Unidade	Valor
Fluxo de automóveis	CET-SP (2017)	veículos/h	4.985
Fluxo de ônibus	CET-SP (2017)	veículos/h	91
Ocupação de automóveis	Metrô-SP (2017)	pax/veículo	1,41
Ocupação de ônibus	SPTTrans (2020)	pax/veículo	85,4
Demanda no TIA	Autor	pax/h	7.030
Demanda no TCO	Autor	pax/h	7.799
Demanda no Pico	Autor	pax/h	14.829
Divisão modal – TIA	Autor	%	47,4%
Divisão modal – TCO	Autor	%	52,6%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados publicados pelas fontes citadas

C) Parâmetros para o modelo comportamental – nível inferior, ninho Pico

Uma vez estabelecidas as características da demanda no cenário de referência – no sentido de interesse, no respectivo período de pico –, o nível inferior do modelo comportamental dos usuários é calibrado de modo a refletir as condições observadas.

³⁷ Foram excluídas desta média as medidas as feitas na seção transversal junto à Parada Eldorado, tendo em vista que trafegam pelo trecho uma quantidade relevante de ônibus que não servem as paradas do corredor Rebouças, utilizados pelos serviços de transporte metropolitano.

Primeiramente, são calculados os custos generalizados de viagem em cada um dos modos, relativos ao cenário de referência, para obtenção das respectivas utilidades³⁸ em cada modo. Nas equações a seguir são repetidas as formulações das funções de utilidade de cada modo – já apresentadas na seção 4.3.2.3. Na sequência, discorre-se sobre a abordagem para obtenção de cada parâmetro (dentro os não abrangidos nos tópicos anteriores).

$$V_{car,h} = -L \cdot \left[SVT_{car,h} * t_{car,h} + \frac{(T_{car,h} + oc_{car})}{a_{car,h}} \right] - \frac{est_{car}}{a_{car,h}} \quad (0.8)$$

$$V_{bus,h} = -SVT_{bus,h} \cdot [t_{bus,h} * L + \gamma_w * t_{w,h} + \gamma_a * t_{ac}] - T_{bus,h} + \theta_{bus,h} \quad (0.9)$$

Passando-se de parâmetro em parâmetro: conforme exposto na seção 4.2, a distância de viagem L é de 10 km para todos os viajantes, independentemente do modo e período. Os parâmetros SVT , relativos ao valor monetário atribuído ao tempo de viagem pelos usuários, foi baseado nos valores apresentados no relatório metodológico do Simob³⁹, publicado pela ANTP (2018b).

No referido relatório, são apresentados valores para usuários dos modos individual e coletivo, sem distinção de período ou motivo de viagem – tendo-se assumido que se referem aos períodos de pico, posto que estes tipicamente são os objetos de análise em sistemas de transporte. Desta forma, os valores foram atribuídos ao período Pico, no modelo. Destaca-se que os valores são referentes ao ano de 2013 e foram empregados sem atualização monetária por tratam-se de medidas de disposição a pagar dos usuários, em vez de representarem custos propriamente ditos – especialmente tendo em vista que o período entre 2013 e 2017 o país, como um todo, vivenciou períodos de retração econômica e elevada inflação, fazendo com que a renda evoluísse de forma divergente aos custos dos insumos.

³⁸ As utilidades são dadas basicamente pelo oposto dos custos generalizados de viagem. A única distinção entre as utilidades e os custos generalizados de viagem consiste no fato de que as utilidades (dos modos ônibus, especificamente), são afetados pelas constantes específicas (variáveis $\theta_{bus,h}$). Tal relação é apresentada formalmente na descrição do modelo analítico (equação (4.39)).

³⁹ Sistema de Informação da Mobilidade Urbana.

Os valores efetivamente utilizados são apresentados na Tabela 0.10. Destaca-se que, na ausência de valores específicos por período, os parâmetros relativos aos usuários do Fora-Pico foram estimados com base na proporção média entre os parâmetros empregados por Basso e Silva (2014) para cada período, no modelo da cidade de Santiago (i.e., 56,5%).

Tabela 0.10: Estimativas de Valor Subjetivo do Tempo (parâmetro SVT), por modo e por período

Informação	Fonte Primária	Unidade	Valor
$SVT_{car,p}$	ANTP (2018b)	R\$/h	9,87
$SVT_{bus,p}$	ANTP (2018b)	R\$/h	7,10
$SVT_{car,o}$	Basso e Silva (2014)	R\$/h	5,58
$SVT_{bus,o}$	Basso e Silva (2014)	R\$/h	4,01

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados publicados pelas fontes citadas

Os tempos de viagem são calculados com base nas respectivas funções de desempenho do sistema viário descritas na seção 4.3.1 e no início deste apêndice. No que diz respeito às tarifas ($T_{car,h}$ e $T_{bus,h}$), destaca-se que as correspondentes ao modo automóvel são equivalentes à zero, por não haver tal cobrança no cenário de referência. A tarifa no modo ônibus, por sua vez, foi definida com base no reportado na Planilha Tarifária do Sistema de Transporte Coletivo Urbano para 2016 (SPTrans, 2015), no valor de R\$ 3,80. Para fins de cálculo da função de utilidade, considerou-se também a magnitude da tarifa média paga por embarque, em relação à tarifa-base de R\$ 3,80, considerando todos os descontos e gratuidades tarifários incidentes, resultando em uma tarifa média de R\$ 1,76 (equivalente a 46,4% da tarifa-base). Finalmente, tal valor foi atualizado para 2017 por meio dos valores apresentados na Tabela 0.1, para o contexto nacional, resultando em R\$ 1,86. Conforme ilustrado na Tabela 0.11, as tarifas do modo ônibus foram mantidas iguais entre os períodos – não só no cenário de referência mas também nos cenários alternativos simulados, exceto quando explicitamente indicado diferentemente.

Tabela 0.11: Tarifas no cenário de referência, por modo e por período

Informação	Fonte Primária	Unidade	Valor
$T_{bus,p}$	SPTrans (2015)	R\$	1,86
$T_{car,p}$	-	R\$	-
$T_{bus,o}$	SPTrans (2015)	R\$	1,86
$T_{car,o}$	-	R\$	-

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados publicados pelas fontes citadas

Os custos operacionais dos automóveis (oc_{car}) foram estimados com base no empregado pela ANTP (2018a), resultando em 0,6 R\$/km – em valores de 2016, ou 0,63 R\$/km, em valores de 2017. Os custos de estacionamento, por sua vez, foram adotados como equivalentes a R\$ 5,00 por viagem, de forma simbólica. Destaca-se que, uma vez que tais parâmetros e variáveis associadas (i.e., distância de viagem) são considerados de forma idêntica em ambos os períodos e não são alterados ao longo das simulações; os valores efetivamente empregados apresentam relevância desprezível para a etapa de modelagem, posto que seu valor é compensado no processo de estimativa dos parâmetros $\theta_{bus,h}$, conforme exposto adiante.

Finalmente, os parâmetros de ponderação das demais componentes do tempo de viagem por ônibus, que não o tempo dentro do veículo, foram definidos partindo-se do exposto por Abrantes e Wardman (2011): os quais, por meio uma meta-análise de estudos sobre ponderação dos atributos que compõem o custo generalizado de viagem no Reino Unido, concluíram haver diferenças inferiores a 6% entre os coeficientes γ_w e γ_a para usuários de ônibus. Os valores efetivamente obtidos resultaram entre 1,0 e 1,6, para ambos os parâmetros.

Entretanto, postula-se que tais pesos sejam maiores em países em desenvolvimento, devido a aspectos como: menor pontualidade e regularidade na operação; sistemas de informação mais precários, e; pela ocorrência de ambientes para caminhada e espera com infraestrutura mais precária e com menor qualidade em relação à segurança pública. De fato, Basso e Silva (2014) adotaram valores próximos de 2 para o tempo de espera em Santiago (i.e., 1,93; e 3,63 para o tempo de caminhada), de modo que no presente modelo optou-se pelo valor de 2 para ambos os parâmetros de ponderação.

Tabela 0.12: Valor dos demais parâmetros presentes nas funções de utilidade

Informação	Fonte Primária	Unidade	Valor
est_{car}	-	R\$	5,00
oc_{car}	ABNT (2018a)	R\$/km	0,63
γ_w	Basso e Silva (2014); Abrantes e Wardman (2012)	-	2,0
γ_a	Basso e Silva (2014); Abrantes e Wardman (2012)	-	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados publicados pelas fontes citadas

Definidos os parâmetros, é possível obter os custos generalizados de viagem por modo, no período Pico. Para obtenção das utilidades, efetivamente, faz-se necessário

definir o parâmetro $\theta_{bus,p}$. No processo para fazê-lo, é necessário calcular os custos generalizados de viagem em cada modo a partir das equações do modelo analítico – e, logo, com base em suas premissas, tratando-se o segmento viário em análise como homogêneo nos termos apresentados ao longo do Capítulo 4.

Na Tabela 0.13 são sumarizadas as informações de entrada e na Tabela 0.14 são apresentados os resultados produzidos pelo modelo analítico para o cenário base. Deste ponto em diante, passa-se a utilizar o termo “cenário base” em lugar do “cenário de referência” pois os parâmetros apresentados dizem respeito ao segmento viário homogêneo e demais relações representadas dentro do modelo analítico, em vez de referirem-se ao cenário observado.

Tabela 0.13: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Pico, a partir das equações do modelo analítico – Dados de entrada

Informação	Unidade	Valor
L	km	10
y_p	pax/h/10km	14.829
$y_{p,car}$	pax/h/10km	7.030
$y_{p,bus}$	pax/h/10km	7.799
$a_{car,p}$	pax/veículo	1,41
k_{bus}	pax/veículo	100
$load_{p,avg}$	%	85,4%
$t_{ff,car}$	h/km	1/37,4
$t_{ff,bus}$	h/km	1/24,8
p_{cor}	paradas/km	1,64
$SVT_{car,p}$	R\$/h	9,87
$SVT_{bus,p}$	R\$/h	7,10
$T_{bus,p}$	R\$	1,86
$T_{car,p}$	R\$	0,00
est_{car}	R\$	5,00
oc_{car}	R\$/km	0,63
γ_w	-	2,0
γ_a	-	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cálculo dos tempos gastos nos pontos de parada (i.e., em manobras de embarque e desembarque e em filas), foi empregada a formulação do modelo analítico, considerando a demanda estimada para a seção como a demanda média (homogeneamente distribuída) do segmento de 10 km em análise.

Tabela 0.14: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados

Informação	Unidade	Valor
$f_{bus,p}$	ônibus/h	91
$t_{car,p}$	h/km	1/8,2
$t_{boa/ali,p}$	seg/km	44
$t_{stop,p}$	seg/km	121
$t_{bus,p}$	h/km	1/24,8
$t_{bus,p} + t_{boa/ali,p} + t_{stop,p}$	h/km	1/11,6
$t_{w,p}$	seg/10km	19,7
t_a	seg/10km	305
$CVG_{car,p}$	R\$/10km	20,1
$CVG_{bus,p}$	R\$/10km	9,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que a velocidade média ao longo do corredor de ônibus ($t_{bus,p} + t_{boa/ali,p} + t_{stop,p}$) resultou em 11,6 km/h – valor próximo da velocidade média reportada por Wakai e Hortellani (2017) para o cenário de referência, de 12,4 km/h.

Uma vez calculados os custos generalizados de viagem, prossegue-se para a estimação do parâmetro $\theta_{bus,p}$. Seu cálculo é dado pela equação (4.39), reproduzida na equação (0.10), e depende do valor do parâmetro λ_2 . O valor de λ_2 , por sua vez, pode ser dado pela equação (4.38), reproduzida na equação (0.11).

$$\theta_{bus,h} = - \left\{ \tilde{V}_{0,bus,h} - V_{0,car,h} + \frac{1}{\lambda_2} * \ln \left[\left(\frac{1}{p_{0,bus,h}} \right) - 1 \right] \right\} \quad (0.10)$$

$$\eta_k^{p_{m|h}} = \eta_k^{Y_{m|h}} = (1 - p_{m|h}) * \beta_{k,m|h} * X_{k,m|h} * \lambda_2 \quad (0.11)$$

Basso e Silva (2014) admitem uma elasticidade implícita da demanda por ônibus no pico, em relação à tarifa do ônibus no pico ($\eta_{T_{bus,p}}^{Y_{bus,p}}$), equivalente à -0,25. No emprego da elasticidade, considerou-se o valor da tarifa-base de ônibus (R\$ 4,00, em valores de 2017), postulando-se que a elasticidade da demanda se manifeste por meio dos usuários que arcam com o valor integral da tarifa, sem descontos. Replicando-se esta condição no presente modelo, resultam:

$$\lambda_2 = \frac{-0,25}{(1 - p_{bus|p}) * \beta_{T_{bus,p}} * T_{bus,p}} = \frac{-0,25}{(1 - 0,526) * 1 * 4,00} = 0,13$$

$$\theta_{bus,p} = -\left\{(9,3 - 20,1) + \frac{1}{0,13} * \ln\left[\left(\frac{1}{0,526}\right) - 1\right]\right\} = -10,0$$

D) Parâmetros para representação da demanda – período Fora-Pico e dia-de-trabalho

A partir dos valores de demanda obtidos para o período Pico, obtêm-se os demais parâmetros para representação da demanda. Primeiramente, estabelece-se a demanda do Fora-Pico (y_p) com base no parâmetro $\varphi_{p,Y}^o$ (calculado com base nos valores apresentados na Tabela 0.6). Resulta que:

$$y_o = \varphi_{p,Y}^o * y_p = 14.829 * 49\% = 7286 \frac{pax}{h} \quad (0.12)$$

Adicionalmente, analisou-se a porcentagem de habitantes da RMSP que não realiza viagens, em comparação aos que realizam viagem nos períodos Manhã/Tarde ou no Entrepico, para fins de estimativa da porcentagem de não-viajantes a ser considerada no nível superior do modelo analítico (p_{nt}). Foi calculada a porcentagem de pessoas que realizam viagens nos períodos Manhã/Tarde (%P), a porcentagem de pessoas que realiza viagens no Entrepico (%O) e a porcentagem de pessoas que não realiza viagens em nenhum dos períodos citados (%NT) – permitindo-se dupla-contagem entre “%P” e “%O”. A variável p_{nt} foi, então, calculada com base na equação a seguir.

$$p_{nt} = \frac{\%NT}{\%NT + \%P + \%O} = \frac{30\%}{30\% + 60\% + 45\%} = 22,3\% \quad (0.13)$$

A partir das equações (4.1) e (4.2), reproduzidas a seguir nas equações (0.14) e (0.15), é possível obter os valores de p_p e p_o consistentes com a estrutura do modelo analítico, conforme indicado na equação (0.16) – derivada das duas anteriores.

$$Y_{tot} = Y_{pot} = Y_{nt} + Y_p + Y_o = Y_{pot} * p_{nt} + Y_{pot} * p_p + Y_{pot} * p_o \quad (0.14)$$

$$Y_h = H_h * y_h = H_h * \sum_{m \in \{car; bus\}} y_{h,m} \quad (0.15)$$

$$\frac{Y_{pot} * p_o}{(H_o * y_o)} = \frac{Y_{pot} * (p_p + p_o)}{(H_p * y_p + H_o * y_o)} \quad (0.16)$$

Primeiramente, de (0.14) e do resultado de (0.13), decorre que:

$$p_p + p_o = (1 - p_{nt}) = 77,7\%$$

Após transformações algébricas em (0.16), obtém-se:

$$p_o = \frac{(H_o * y_o)}{(H_p * y_p + H_o * y_o)} * (p_p + p_o) = \frac{21 * 7286}{21 * 7286 + 8 * 14829} * 77,7\% = 43,8\%$$

$$\Rightarrow p_p = 33,9\%$$

Por fim, de posse de cada percentagem de escolha individualmente, resulta a estimativa de demanda potencial (ou total), dada por:

$$Y_{pot} = \frac{Y_{nt}}{p_{nt}} = \frac{Y_p}{p_p} = \frac{Y_o}{p_o} = \frac{(H_o * y_o)}{p_o} = \frac{(21 * 7286)}{43,8\%} = 349617$$

Os parâmetros para representação da demanda resultantes da abordagem descrita são sumarizados na Tabela 0.15.

Tabela 0.15: Resumo dos parâmetros para representação da demanda

Informação	Unidade	Valor
y_p	pax/h/10km	14.829
y_o	pax/h/10km	7.286
p_{nt}	%	22,3%
p_p	%	33,9%
p_o	%	43,8%
Y_p	pax/dia/10km	118.630
Y_o	pax/dia/10km	153.007
Y_{nt}	pax/dia/10km	77.980
Y_{tot}	pax/dia/10km	349.617

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que há mais viagens sendo realizadas no Fora-Pico que no Pico, dentro do dia (i.e., do dia-de-trabalho). O Fora-Pico possui 29% a mais de demanda, no dia, ao passo que possui mais que o dobro das horas de duração do Pico (162% mais horas).

E) Parâmetros para as funções de utilidade – estrutura hierárquica

Uma vez estabelecidos os parâmetros relativos à demanda, prossegue-se para a definição dos parâmetros faltantes para a determinação do modelo comportamental. Em específico, resta serem definidos o parâmetro de escala do nível superior (λ_1) e as constantes específicas $\theta_{bus,o}$, θ_p e θ_o . O processo de definição é análogo ao praticado para o período Pico.

Primeiramente, calcula-se o parâmetro $\theta_{bus,o}$. Para tanto, admite-se o mesmo parâmetro de escala para ambos os períodos (i.e., Pico e Fora-Pico) e calcula-se a divisão modal observada no Fora-Pico com base nas variações da demanda em cada modo, de um período para o outro – em uma análise análoga à apresentada na Tabela 0.6, porém por modo de transporte. Os dados reunidos para esta análise são apresentados na Tabela 0.16:

Tabela 0.16: Variação relativa da demanda entre modos, dentre os períodos representados no modelo

Modo	Período “Pico” (viagens/h/sentido)	Período “Fora-Pico” (viagens/h/sentido)	Participação no Pico (%)	Participação no Fora-Pico (%)
Automóveis	0,55 milhões	0,28 milhões	47%	49%
T. Coletivo	0,62 milhões	0,29 milhões	53%	51%
Ambos	1,17 milhões	0,58 milhões	100%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em dados fornecidos por Metrô-SP (2017)

Nota-se que a queda de demanda por hora no transporte coletivo, do Pico para o Fora-Pico, é superior à observada nos automóveis. Para trazer tal informação para o modelo, tomou-se tais porcentagens como aproximações de uma medida genérica de divisão modal (variáveis $\hat{p}_{m,h}$) e utilizou-se a razão apresentada a seguir como referência:

$$\frac{\left(\frac{\hat{p}_{bus,p}}{\hat{p}_{car,p}}\right)}{\left(\frac{\hat{p}_{bus,o}}{\hat{p}_{car,o}}\right)} = \frac{\left(\frac{53\%}{47\%}\right)}{\left(\frac{51\%}{49\%}\right)} = 1,08$$

Com base no valor adimensional apresentado, considerou-se que no modelo analítico as divisões modais relativas ao cenário base, no Fora-Pico, seriam tais que se manteria o mesmo valor para esta razão no cenário base, no modelo – conforme indicado na equação (0.17):

$$\frac{\left(\frac{p_{0,bus,p}}{p_{0,car,p}}\right)}{\left(\frac{p_{0,bus,o}}{p_{0,car,o}}\right)} = 1,08 \Rightarrow p_{0,bus,o} = \frac{p_{0,bus,p}}{-1,08 * p_{0,bus,p} + p_{0,bus,p} + 1,08} \quad (0.17)$$

Desta relação, substituindo-se o valor de $p_{0,bus,p}$ pelo obtido na seção Apêndice: B) (i.e., 52,6%), resultam as divisões modais de 50,6% e 49,4% (para ônibus e automóveis, respectivamente). De forma análoga ao desenvolvido para o Pico, pôde-se então obter a constante $\theta_{bus,o}$. Os dados de entrada gerados para o Fora-Pico são resumidos na Tabela 0.17:

Tabela 0.17: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Fora-Pico, a partir das equações do modelo analítico – Dados de entrada

Informação	Unidade	Valor
L	km	10
y_o	pax/h/10km	7.286
$y_{o,car}$	pax/h/10km	3.598
$y_{o,bus}$	pax/h/10km	3.688
$a_{car,o}$	pax/veículo	1,51
k_{bus}	pax/veículo	100
$load_{o,avg}$	%	45,3%
$t_{ff,car}$	h/km	1/37,4
$t_{ff,bus}$	h/km	1/24,8
p_{cor}	paradas/km	1,64
$SVT_{car,o}$	R\$/h	5,57
$SVT_{bus,o}$	R\$/h	4,01
$T_{bus,o}$	R\$	1,86
$T_{car,o}$	R\$	0,00
est_{car}	R\$	5,00
oc_{car}	R\$/km	0,63
γ_w	-	2,0
γ_a	-	2,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos dados de entrada apresentados e nas equações do modelo analítico, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 0.18. Por meio de cálculos análogos aos apresentados na equação (0.10), obteve-se o valor de -3,9 para o parâmetro $\theta_{bus,o}$.

Tabela 0.18: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base, no período Fora-Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados

Informação	Unidade	Valor
$f_{bus,o}$	ônibus/h	81
$t_{car,o}$	h/km	1/31,6
$t_{boa/ali,o}$	seg/km	34
$t_{stop,o}$	seg/km	37
$t_{bus,o}$	h/km	1/24,8
$t_{bus,o} + t_{boa/ali,o} + t_{stop,o}$	h/km	1/16,6
$t_{w,o}$	seg/10km	22,1
t_a	seg/10km	305
$CVG_{car,o}$	R\$/10km	9,0
$CVG_{bus,o}$	R\$/10km	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cálculo das constantes específicas das alternativas no nível superior do modelo comportamental (θ_p e θ_o), por sua vez, é necessário calcular o valor do parâmetro de escala associado ao nível superior (λ_1). Para tanto, empregou-se a mesma relação admitida por Basso e Silva (2014) entre os parâmetros de escala, apresentada a seguir:

$$\lambda_1 = 0,25 * \lambda_2 \Rightarrow \lambda_1 = 0,25 * 0,13 = 0,033 \quad (0.18)$$

Estabelecido o parâmetro de escala do nível superior, as constantes específicas das alternativas são dadas pelas equações (4.48) e (4.49), reproduzidas a seguir com o respectivo resultado produzido:

$$\theta_p = \ln \left(\frac{p_{0,p}}{p_{0,nt}} \right) * \frac{1}{\lambda_1} - \tilde{V}_{0,p} = 27,1 \quad (0.19)$$

$$\theta_o = \ln \left(\frac{p_{0,o}}{p_{0,nt}} \right) * \frac{1}{\lambda_1} - \tilde{V}_{0,o} = 24,1 \quad (0.20)$$

As constantes podem ser percebidas como a utilidade incremental de se realizar viagens em cada período, em comparação à opção de não viajar (medidas em R\$/10km). Nota-se que, apesar de haver mais viagens no Fora-Pico que no Pico, os resultados indicam haver maior benefício percebido em viajar no Pico – potencialmente associado à motivação das viagens realizadas no Pico.

F) Parâmetros para estimativa das emissões veiculares de poluentes

Uma vez que o modelo analítico produz apenas resultados em termos médios (e.g., velocidades médias), faz-se necessário empregar métodos para estimativas de emissões veiculares de poluentes (EVP) compatíveis com os indicadores operacionais disponíveis.

Desta forma, optou-se por considerar como referência os modelos mesoscópicos/baseados na condição de tráfego, conforme a taxonomia apresentada na seção 3.2. Em outras palavras, trata-se dos modelos baseados em ciclos de condução, uma vez que estes correlacionam condições típicas de tráfego – que podem ser descritas através de seus parâmetros médios (e.g., velocidades, dispersão das velocidades, número de paradas) – com emissões unitárias (em g/VKM).

O fenômeno fundamental que se busca capturar no modelo analítico, por meio do uso de modelos baseados em ciclos de condução, é a variação média dos perfis de velocidade e aceleração instantâneas – e, por conseguinte, das EVP associadas – conforme as velocidades médias variam. Para tanto, empregou-se uma abordagem para obtenção de curvas de taxas de emissões em função da velocidade média praticada, descrita a seguir.

Os dados primários utilizados na abordagem são as emissões unitárias identificadas em ensaios de ciclos de condução realizados no Brasil por Lents et al. (2004) e IPT (2007). Para mais detalhes sobre ciclos de condução no âmbito do contexto nacional, leitores são remetidos ao estudo de Castro (2008).

a) Ônibus

Para os ônibus, tomou-se como referência os resultados associados a três ciclos de condução representativos da operação em três regimes de tráfego (ou níveis de congestionamento) distintos, reportados pelo IPT (2007) em ensaios acompanhados por sua equipe técnica.

Os três ciclos de condução adotados para aferir as emissões unitárias por ônibus consistem nos ciclos ensaiados pelo IPT (2007) em São Paulo, abrangendo condições de operação de ônibus sensivelmente distintas. Trata-se dos ciclos “Manhattan”, “Orange County” e “Expresso Tiradentes”. Os três ciclos foram determinados, no estudo original, buscando refletir condições operacionais em contextos distintos, a

saber, respectivamente: (i) operação em tráfego misto; (ii) operação em faixa exclusiva, em via compartilhada, com interferências por interseções e semáforos; e (iii) operação em via exclusiva, sem interferência por interseções ou semáforos. Foram tomados como referência os ensaios realizados com ônibus do tipo “Padron – EURO III” por serem o único tipo veicular com resultados disponíveis para os três ciclos de condução e por serem representativos da frota então em circulação.

Com base nas emissões unitárias e nas velocidades médias resultantes em cada ciclo de condução considerado, gerou-se curvas de emissões unitárias em função das velocidades médias, por interpolação. Os dados de entrada utilizados na interpolação são apresentados na Tabela 0.19.

Tabela 0.19: Emissões unitárias e velocidades médias por ciclo de condução – Ônibus

Ciclo de Condução	Velocidade (km/h)	CO ₂ (g/km)	PM _{2.5} (g/km)
Manhattan	11	1632,8	0,385
Orange County	19,8	1315,7	0,215
Expresso Tiradentes	26,2	787,9	0,167

Fonte: IPT (2007)

Para interpolação, foram consideradas as duas formas funcionais mais comuns para curvas de emissões unitárias em função da velocidade apresentadas na versão de 2009⁴⁰ do *Emission Inventory Guidebook* (Manual para Inventário de Emissões, em tradução livre, publicado pela EEA): uma função polinomial de segundo grau (0.21) e uma função exponencial (0.22). Nas equações, substituiu-se os termos correspondentes às velocidades médias pelo seu inverso (i.e., taxas de viagem), para compatibilidade com a notação do modelo analítico.

$$ue_{m,pol,2007,h} = f\left(\frac{1}{t_{m,h}}\right) = \beta_1 * \left(\frac{1}{t_{m,h}}\right)^2 + \beta_2 * \left(\frac{1}{t_{m,h}}\right) + \beta_3 \quad (0.21)$$

⁴⁰ Na versão de 2019 do manual supracitado, são apresentadas equações em formulação única, com 7 parâmetros de calibração interagindo com a velocidade média (v), representados pelas sete letras gregas presentes na equação $\frac{(\alpha*v^2 + \beta*v + \gamma + \frac{\delta}{v})}{(\varepsilon*v^2 + \zeta*v + \eta)}$. Entretanto, como se dispunha de apenas três medições de emissões unitárias em ciclos de condução distintos para os ônibus, ateve-se às formas funcionais empregadas na versão anterior do referido manual.

$$ue_{m,pol,2007,h} = f\left(\frac{1}{t_{m,h}}\right) = \beta_4 * \left(\frac{1}{t_{m,h}}\right)^{\beta_5} \quad (0.22)$$

Optou-se pelo uso da forma polinomial, por esta ser compatível com comportamentos côncavos e convexos igualmente. Para além dos pontos extremos da interpolação, optou-se por manter as emissões unitárias constantes e equivalentes aos valores nos pontos extremos, de forma similar ao considerado pelo IEMA (2017).

Tendo em vista que os valores apresentados pelo IPT (2007) foram gerados há mais de 10 anos, admitiu-se que as funções obtidas pela interpolação descrita eram representativas de um cenário mais antigo, no qual circulava uma frota com tecnologias significativamente distintas das empregadas atualmente.

Por esta razão, às curvas supracitadas adicionou-se um termo multiplicativo correspondente à atualização tecnológica ($\alpha_{tech,m,pol}$, específico por poluente e modo de transporte), buscando tornar as estimativas compatíveis com o cenário de referência (i.e., o ano de 2017). Tais valores foram estabelecidos com base no reportado pela CETESB (2018a)⁴¹, em seu Inventário de EVP para o Estado de São Paulo, com respeito às emissões unitárias médias da frota circulante em cada ano (desde 2006) e para cada poluente – referidos por “indicador tecnológico” na publicação original.

Para os ônibus, foram adotados valores relativos a caminhões (por predominarem amplamente, dentre ambos, motores à diesel), e para os automóveis, os referentes a automóveis, quando disponíveis⁴². As curvas de emissões unitárias pelo escapamento (em g/VKM) resultantes do procedimento de interpolação para os poluentes relevantes (conforme identificado na revisão bibliográfica apresentada na seção 2.3) são

⁴¹ Valores aferidos graficamente, por não serem apresentados explicitamente em tabelas na publicação original.

⁴² Para anos anteriores a 2006 fora adotado o valor correspondente a 2006, por ser o ano mais antigo com valores reportados. Na ausência de valores reportados para uma dada categoria veicular, fora adotado o valor da outra categoria veicular.

apresentadas a seguir: sua forma genérica por meio da equação (0.23) e os parâmetros efetivamente utilizados na Tabela 0.20.

Destaca-se que os poluentes CH₄ e N₂O foram excluídos do conjunto de GEE contemplados, durante a exploração do modelo analítico, por terem se mostrado desprezíveis para o cálculo dos montantes totais de GEE, em termos quantitativos. Este fenômeno pode ser validado pelos resultados obtidos pelo IEMA (2020), em seu Monitor de EVP pelo transporte público no MSP, segundo o qual as emissões de GEE em Setembro/2020 consistiram 99% de emissões de CO₂.

$$ue_{m,pol,h} = \alpha_{tech,m,pol} * \left[\beta_1 * \left(\frac{1}{t_{m,h}} \right)^2 + \beta_2 * \left(\frac{1}{t_{m,h}} \right) + \beta_3 \right] \quad (0.23)$$

Tabela 0.20: Parâmetros das funções de emissões unitárias de poluentes – Ônibus

Poluente	Parâmetro	Valor
CO ₂	$\alpha_{tech,m,pol}$	89%
CO ₂	β_1	-3,1
CO ₂	β_2	58
CO ₂	β_3	1364
PM _{2.5}	$\alpha_{tech,m,pol}$	37%
PM _{2.5}	β_1	$7,8 \cdot 10^{-4}$
PM _{2.5}	β_2	-0,043
PM _{2.5}	β_3	0,77

Fonte: Elaborado pelo autor

b) Automóveis

Para automóveis, foi empregada abordagem análoga considerando os ciclos de condução medidos por Lents et al. (2004). Para detalhes sobre a campanha de medições realizadas por Lents et al. (2004) e sobre o IVEM (modelo internacional de emissões veiculares; sigla em inglês) – modelo de EVP baseado em tais medições –, leitores são remetidos à dissertação de Castro (2008).

As medições realizadas por Lents et al. (2004) foram realizadas em 2004 e abrangem uma ampla gama de ciclos de condução. Para geração das curvas de emissões unitárias para automóveis, foram considerados os mesmos ciclos de condução utilizados por Castro (2008) em suas estimativas de EVP para a cidade de São Paulo. Os ciclos efetivamente considerados e respectivos indicadores são apresentados na Tabela 0.21 – na qual a sigla “PC” refere-se a “carro de passeio”, na

abreviação em inglês. Os parâmetros das funções ajustadas são apresentados na Tabela 0.22.

Tabela 0.21: Emissões unitárias e velocidades médias por ciclo de condução – Automóveis

Ciclo de Condução	Velocidade (km/h)	CO_2 (g/km)	PM_{10} (g/km)
PC Arterial SP 11:00h	32,2	32,2	207
PC Arterial SP 20:00h	28,1	28,1	221
PC Arterial SP 14:00h	24,3	24,3	273
PC Arterial SP 8:00h	22,2	22,2	279
PC Arterial SP 7:00h	17,1	17,1	314
PC Arterial SP 18:00h	14,9	14,9	366

Fonte: Lents (2004, *apud* CASTRO, 2008)

Destaca-se que nos dados fornecidos por Lents et al. (2004) os valores referentes ao Material Particulado referem-se ao PM_{10} . Em linha com as aproximações citadas no item 3.3.2.3, considerou-se que 60% do PM_{10} corresponde a $PM_{2.5}$. Essa aproximação já está refletida nos parâmetros apresentados na Tabela 0.22.

Tabela 0.22: Parâmetros das funções de emissões unitárias de poluentes – Automóveis

Poluente	Parâmetro	Valor
CO_2	$\alpha_{tech,m,pol}$	78%
CO_2	β_1	0,19
CO_2	β_2	-18
CO_2	β_3	578
$PM_{2.5}$	$\alpha_{tech,m,pol}$	35%
$PM_{2.5}$	β_1	$1,1 \cdot 10^{-6}$
$PM_{2.5}$	β_2	$-1,1 \cdot 10^{-4}$
$PM_{2.5}$	β_3	$4,1 \cdot 10^{-3}$

Fonte: Elaborado pelo autor

c) Emissões de material particulado que não pelo escapamento

Novamente, deve-se ter em vista que o Material Particulado é emitido não só na forma de emissões pelos escapamentos dos veículos, mas também via desgaste de peças (e.g., freios) e do pavimento, conforme considerado pela EEA (2019). Para cálculo do fator φ_{PM} – empregado para converter as emissões de PM pelo escapamento em emissões de PM totais – considerou-se os valores utilizados pelo IEMA (2020), fornecidos originalmente pela EEA (2019).

Em específico, verificou-se a razão entre emissões de PM pelo escapamento e emissões totais de PM para ônibus dos tipos padron e articulado e tomou-se a média dos valores como referência. Nesta análise, foram considerados ônibus compatíveis

com a fase P7 do PROCONVE (Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores), em vigor desde 2012, e adotada uma velocidade de percurso de 15 km/h. Os valores utilizados na análise são apresentados na Tabela 0.23, resultando em $\varphi_{PM} = 48\%$. Foi empregado este mesmo valor para automóveis.

Tabela 0.23: Relação entre emissões de PM pelo escapamento e por ressuspensão

Parâmetro	Veículo	Velocidade (km/h)	Valor (g/km)
PM_{10} - combustível	Padron (P7)	15,0	0,079
PM_{10} - desgaste	Padron (P7)	15,0	0,097
PM_{10} - combustível	Articulado (P7)	15,0	0,098
PM_{10} - desgastel	Articulado (P7)	15,0	0,097

Apêndice: Fonte: Elaborado pelo autor

G) Parâmetros para cálculo de custos operacionais e econômicos

Uma vez estabelecidas as condições operacionais e de demanda associadas ao cenário base, juntamente das emissões veiculares de poluentes associadas, prossegue-se para o cálculo dos custos sociais. Tais custos incidem tanto na forma de custos operacionais do sistema de transporte coletivo como na forma de custos externos decorrentes das emissões veiculares de poluentes.

Nesta seção, são apresentados detalhes do processo de cálculo para três componentes não detalhadas no Capítulo 4:

- Custos operacionais do sistema de TCO
- População exposta ao $PM_{2.5}$
- Valoração dos impactos decorrentes das emissões

a) Custos operacionais do sistema de transporte coletivo por ônibus

Os custos operacionais são representados decompostos segundo a lógica usual de dividi-los em custos fixos e custos variáveis. Tradicionalmente, a divisão feita separa custos variáveis com a quilometragem percorrida (usualmente referidos por “custos variáveis”) de custos não-dependentes diretamente da quilometragem percorrida (usualmente referidos por “custos fixos”).

Na representação considerada no modelo, os custos são desagregados adicionalmente, sendo compostos por três parcelas, a saber: custos proporcionais à quilometragem percorrida (i.e., os “custos variáveis”); custos proporcionais à frota em operação (ou proporcionais às horas de operação e doravante referidos por “custos horários”) e custos proporcionais ao porte do sistema (doravante referidos por “custos

do sistema”). Exemplos de rubricas consideradas em cada uma das três componentes de custos operacionais consideradas são:

- **Custos quilométricos:** consumo de combustível e lubrificantes;
- **Custos horários:** mão-de-obra operacional (motoristas e cobradores); e
- **Custos do sistema:** depreciação dos veículos e custo de capital.

O interesse da subdivisão dos custos usualmente incluídos nos chamados “custos fixos”, em custos horários e custos do sistema, é capturar a influência da operação em cada período independentemente sobre os custos operacionais. Posto que o período Pico requeira sempre maior frota operacional que o período Fora-Pico, a aquisição de veículos e todo o dimensionamento do porte do sistema será norteado pelos requisitos operacionais deste período. Isto implica dizer que as parcelas compreendidas nos custos do sistema independem da operação nos demais períodos – no presente modelo representados pelo período Fora-Pico –, motivando um tratamento específico para tal componente. Isto implica ainda que o custo marginal de ampliar o porte da operação no Pico é tipicamente superior ao do Fora-Pico, uma vez que gera acréscimos tanto em termos de custos horários quanto em termos de custos do sistema.

Os custos horários, por sua vez, são os custos considerados proporcionais ao dimensionamento da operação de cada período individualmente. Custos de mão-de-obra operacional, por exemplo, são considerados como enquadrados nesta categoria, uma vez que caso a frota operacional em um dado período seja reduzida, tais custos serão reduzidos proporcionalmente no período em questão. Destaca-se que os custos do sistema não possuem esta propriedade quando tratando-se de períodos que não o Pico.

Isto posto, expressa-se os custos quilométricos em $\left[\frac{R\$}{\text{veic} \cdot \text{km}} \right]$; os custos horários, em $\left[\frac{R\$}{\text{veic} \cdot \text{hora}} \right]$; e os custos do sistema em $\left[\frac{R\$}{\text{veh} \cdot \text{hora}_{\text{pico}}} \right]$, considerando que o porte do sistema é dimensionado com base na operação dos períodos de pico e, portanto, que essa componente incide apenas sobre as horas de operação dos referidos períodos. A subdivisão acima é empregada apenas para fins de representação dos custos marginais associados a cada período, não tendo apelo realístico uma vez que a operação é custeada de forma integrada, em vez de por período individualmente.

Valores médios para tais componentes para a operação do sistema de TCO do Município de São Paulo foram estabelecidos com base nos dados reportados pela SPTrans (2015) e são sumarizados na Tabela 0.24. Tais valores são mantidos constantes ao longo dos exercícios práticos (exceto quando explicitamente indicado diferentemente).

Tabela 0.24: Custos médios operacionais de referência para sistemas de TCO

Componente	Unidade	Valor Médio (R\$ de 2016)	Valor Médio (R\$ de 2017)
Custos quilométricos (C_q)	$\frac{R\$}{\hat{\sigma}_{nibus} * km}$	2,11	2,23
Custos horários (C_h)	$\frac{R\$}{\hat{\sigma}_{nibus} * hora}$	68,8	72,5
Custos do sistema (C_s)⁴³	$\frac{R\$}{\hat{\sigma}_{nibus} * hora_{pico}}$	48,8	51,4

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos dados divulgados por SPTrans (2015)

Uma vez definidas as componentes de custo, sua parametrização e seus valores médios, o cálculo do custo operacional do sistema de TCO em cada período é dado por:

$$\tilde{C}_{op,bus,o} = C_q * f_{bus,o} * \frac{L}{\tilde{\Phi}_{ap,o}} + C_h * f_{bus,o} * L * t_{bus,o} \quad (0.24)$$

$$\tilde{C}_{op,bus,p} = C_q * f_{bus,p} * \frac{L}{\tilde{\Phi}_{ap,p}} + C_s * f_{bus,p} * L * (t_{bus,p} + t_{bus,o}) + \quad (0.25)$$

$$C_h * f_{bus,p} * L * (t_{bus,p} + t_{bus,o}) - [C_h * f_{bus,o} * L * t_{bus,o}]$$

$$\tilde{\Phi}_{ap,h} = \begin{cases} \frac{1}{2 - \frac{y_o * load_{avg,o}}{y_p * load_{avg,p}}}, & se \ h = p \\ 1, & se \ h = o \end{cases} \quad (0.26)$$

Nas equações acima, o termo “ $(t_{bus,p} + t_{bus,o}) * L$ ” representa o tempo de ciclo referente ao segmento viário de 10 km – ao passo que, quando multiplicado por $f_{bus,h}$, passa a representar a frota requerida para a operação no período h . Destaca-se que

⁴³ Para fins de cálculo, considerou-se como período de pico os períodos entre 6h e 10h e entre 16h30 e 20h30 de dias úteis, considerando-se, ainda, a ocorrência de 250 dias úteis no ano.

a hipótese por trás das equações de custos operacionais individualizadas por período é a de que a frequência dos serviços de ônibus seja maior no Pico que no Fora-Pico – hipótese verificada em todos os cenários apresentados no Capítulo 5. Com base nesta hipótese, os cálculos consideram que a operação dos períodos de Pico⁴⁴ (sentidos dominantes) é responsável por arcar com os custos que incorrem sobre a operação do sentido não-dominante, mas que não são provocados pela demanda dos sentidos não-dominantes⁴⁵. O ponto de interesse por trás dessa formulação é impor que uma viagem marginal adicional no Pico provoque os custos marginais que efetivamente incorreriam sobre a operação total – enquanto ainda empregando-se equações individuais por período (e individuais por sentido, em termos reais).

Nas equações, o termo $\tilde{\phi}_{ap,h}$ representa efeitos associados ao conceito de aproveitamento realizável dos sistemas de TCO – conceito discutido na seção 2.1 e ilustrado na equação (2.1). O efeito diz respeito à majoração aplicável na conversão de valores de PKM (passageiros*quilômetro) em VKM (veículos*quilômetro), em sistemas de TCO.

Parte da majoração discutida na passagem supracitada já incide, no presente modelo, ao considerar uma ocupação média no Fora-Pico inferior à unidade e mais próxima a valores praticáveis, na análise de sentidos de tráfego individualmente. Resta ao termo $\tilde{\phi}_{ap,h}$ representar a parcela correspondente ao desbalanceamento da demanda entre sentidos que não é representada pela diferença entre ocupações médias em cada sentido. A referida parcela se manifesta em casos nos quais um sentido de tráfego requer uma frequência de serviços superior ao que seu sentido

⁴⁴ Que, reitera-se, correspondem aos sentidos dominantes dos períodos de maior carregamento.

⁴⁵ A título de ilustração, considere-se um contexto no qual a demanda no sentido dominante requeira 100 ônibus/hora e a demanda no sentido não-dominante requeira apenas 70 ônibus/hora, os custos decorrentes. Neste contexto, a operação seria dimensionada para operar com 100 viagens/hora, considerando um itinerário em ciclo fechado. A abordagem descrita implica que os custos adicionais que incorrem sobre a operação no sentido não-dominante, em função das 30 viagens/hora adicionais (i.e., $100 - 70 = 30$ viagens adicionais, impostas pela demanda no sentido dominante), passam a ser alocados como custos operacionais do sentido dominante.

oposto demandaria, conforme o respectivo fluxo de passageiros, gerando ociosidade adicional na ocupação dos veículos no sentido oposto.

Tal efeito é calculado segundo a equação (0.26). O efeito é nulo ($\phi_{ap,h} = 1$) no Fora-Pico (período $h = o$), devido à hipótese de simetria na demanda entre sentidos, e é inversamente proporcional ao termo $\frac{y_o * load_{avg,o}}{y_p * load_{avg,p}}$. Neste termo, o numerador é proporcional à frequência de ônibus requerida para atendimento da demanda no Fora-Pico, ao passo que o denominador representa a métrica análoga para o Pico. Desta forma, o termo representa a proporção entre a frequência de serviços no Fora-Pico e no Pico⁴⁶.

Sob a ótica dos custos marginais provocados por uma viagem adicional no Pico, nota-se que a extensão percorrida adicional não é apenas equivalente à distância de viagem no sentido dominante (i.e., L), mas sim a $\frac{L}{\tilde{\phi}_{ap,p}}$. Com efeito, o termo $\tilde{\phi}_{ap,p}$ também varia e afeta o incremento marginal nos custos operacionais. As variações nos custos horários ocorrem de forma análoga, com a parcela de custos horários atribuída ao Fora-Pico sendo invariante face a mudanças na variável $f_{bus,p}$.

É necessário introduzir às equações (0.24) e (0.25) a representação de equilíbrio financeiro da operação no cenário-base, conforme mencionado no início desta seção. No presente modelo, isto se dá por meio da introdução de fatores multiplicativos ($\mu_{0,h}$) sobre o custo operacional que representam a parcela dos mesmos que é financiada pela própria receita gerada no período.

O cálculo destes fatores é descrito na equação (0.27) e, quando maior que a unidade, indica que parte da receita produzida pela operação é alocada ao financiamento de outros períodos da operação (conforme ocorre no Fora-Pico, no presente modelo), no equilíbrio financeiro do sistema no cenário-base. Quando resulta menor que a unidade, por sua vez, indica que parte dos custos operacionais do período são financiados por subsídio cruzado entre períodos ou por fontes externas

⁴⁶ Reitera-se que no presente modelo analítico o sentido não-dominante em períodos de Pico é representado de forma análoga aos sentidos de tráfego no Fora-Pico.

de recursos. Baseando-se em tais fatores, o cálculo dos custos operacionais atribuíveis a cada período h resulta da equação (0.28).

$$\mu_{0,h} = \frac{R_{op,bus,h}}{\tilde{C}_{op,bus,h}} \quad (0.27)$$

$$C_{op,bus,h} = \tilde{C}_{op,bus,h} * \mu_{op,h} \quad (0.28)$$

Tais fatores são mantidos constantes nas análises de cenários alternativos, representando a manutenção da configuração de subsídios cruzados e externos presentes no cenário-base durante a exploração de cenários alternativos. Esta abordagem visa isolar a interferência destes fatores sobre os subsídios adicionais a serem manipulados pelo tomador de decisão (i.e., o planejador do sistema) representado no presente modelo.

b) População exposta ao Material Particulado

Para cálculo da população exposta ao material particulado emitido pela operação dos sistemas de transportes no segmento viário em análise, deve-se estimar a densidade de ocupantes no entorno do corredor. Dado que a dispersão do poluente após sua emissão ocorre transversalmente ao eixo da via, convém representar a variação da densidade populacional em função da distância z ao eixo da via (por meio da variável $pop(z)$).

A densidade populacional $pop(z)$ é calculada em termos horários, para cada período ao longo do dia-de-trabalho, a partir das duas parcelas da população que habita o entorno do segmento em estudo: (i) a população que ocupa⁴⁷ as zonas lindeiras ao corredor (pop_{oc}), durante o dia-de-trabalho, em média, conforme observado com base em dados da Pesquisa Origem-Destino da RMSP (METRÔ-SP, 2017); e (ii) a população que trafega pelo segmento em análise (pop_{tr}), seja por ônibus ou por automóvel, ao longo do dia-de-trabalho. Conforme destacado no segundo tópico da seção 3.3.2, não há um consenso sobre a necessidade de distinguir

⁴⁷ Consiste da soma entre residentes que não saem das respectivas zonas de residência e não-residentes que se deslocam e permanecem nas zonas de interesse.

ambientes abertos e fechados, de modo que ambas as situações são consideradas de forma equivalente no presente modelo.

A parcela (i), denominada densidade populacional de ocupantes (ρ_{oc}), foi estimada em 309 hab/ha durante o dia-de-trabalho, assumidos homogeneamente distribuídos ao longo do entorno do corredor. A Figura 0.2 ilustra o perfil de ocupantes nas zonas lindeiras ao corredor Rebouças, estimado considerando a diferença entre entradas (destinos) e saídas (origens) das zonas em cada intervalo de uma hora (METRÔ-SP, 2017). A título de contextualização, a densidade populacional considerando apenas residentes, nas zonas lindeiras ao corredor, resulta inferior à metade da média horária observada ao longo do dia-de-trabalho: 123 hab/ha.

Figura 0.2: Densidade de ocupantes nas zonas lindeiras ao corredor Rebouças

Fonte: Elaboração do autor, a partir de dados publicados pelo Metrô-SP (2017)

Para fins de cálculo, esta parcela foi tratada na forma de densidade populacional linear, ao longo do eixo transversal à via, em (hab/km)/m, conforme indicado na Tabela 0.25. Foi considerada a densidade de ocupantes média ao longo do dia-de-trabalho. Seu tratamento matemático é apresentado na equação (0.29). Na tabela supracitada, apresenta-se também a densidade populacional média do MSP, de forma a ilustrar que utilizar uma métrica genérica e sem vínculo com o contexto específico pode culminar em subestimativas de impacto relevantes.

$$pop_{oc,h}(z) = \rho_{oc,h} = \rho_{oc} = 30,9 \left[\frac{hab}{m.km} \right], \quad 2 \leq z \leq 232 \quad (0.29)$$

Tabela 0.25: Densidade de ocupantes na área de estudo e valores complementares, para referência

Região	Variável	Densidade (hab/ha)	Habitantes (hab/(km*m))
Zonas lindeiras ao corredor	População presente ao longo do dia-de-trabalho	309	30,9
Zonas lindeiras ao corredor	População residente	123	12,3
Município de São Paulo	População residente	74	7,4

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir dos dados divulgados por METRÔ-SP (2017)

A parcela (ii), referente a pessoas que trafegam no segmento em análise, é essencialmente dependente das condições de operação do sistema de transportes, tanto em termos de usuários viajando quanto em termos das velocidades desempenhadas por cada um dos modos. Seu cálculo consiste em avaliar a quantidade de pessoas viajando em cada hora e a quantidade de tempo que tais usuários permanecem no sistema viário, sendo expostos à poluição junto à via.

Conforme ilustrado na equação (0.30), seu cálculo considera que o fluxo de passageiros de cada modo ($y_{m,h}$) ocupa cada quilômetro do corredor por um tempo equivalente à respectiva taxa de viagem do modo no respectivo período ($t_{m,h}$). A equação (0.31) indica, por sua vez, que esta componente é considerada concentrada na região até 20 metros distante (transversalmente) do eixo da via.

$$pop_{tr,m,h}(z) = \begin{cases} y_{car,h} * t_{car,h}, & se\ m = car \\ y_{bus,h} * (t_{bus,h} + t_{w,h} + t_a), & se\ m = bus \end{cases} \quad (0.30)$$

$$pop_{tr,h}(z) = \begin{cases} \frac{[y_{car,h} * t_{car,h} + y_{bus,h} * (t_{bus,h} + t_{w,h} + t_a)]}{18}, & 2 \leq z \leq 20 \\ 0, & 20 < z \leq 232 \end{cases} \quad (0.31)$$

O cálculo de $pop(z)$ a partir das duas componentes apresentadas é finalmente descrito na equação (0.32). Na referida equação, introduz-se a notação de índice " $\bar{h}$ ", no lugar do índice " h " (relativo ao período de análise), para indicar que a variável refere-se a parâmetros do sentido oposto ao sentido de tráfego em análise. Isto se faz necessário uma vez que as análises são realizadas por sentido de via – os quais admite-se operarem de forma independente do sentido oposto (em um segmento de via de tráfego bidirecional). Não obstante a independência da representação da

operação de cada sentido de circulação no modelo, parte dos resultados do sentido oposto de circulação são relevantes para o desenvolvimento das análises – como no caso da população trafegando no sentido oposto, que acaba por ser exposta à poluição emitida pelo tráfego no sentido de análise, e vice-versa.

$$pop_h(z) = pop_{oc,h}(z) + pop_{tr,h}(z) + pop_{tr,\bar{h}}(z) \quad (0.32)$$

Destaca-se que a população média exposta (variável $\overline{pop}$, utilizada na seção 4.4.3.3) dentro da faixa afetada pelas emissões de Material Particulado (i.e., região distante até 232 metros do eixo da via) resulta em 15,6 mil habitantes, dos quais 14,3 mil são ocupantes (termo utilizado de forma análoga a *urban dwellers*) e 1,3 mil são passageiros.

c) Valoração dos impactos decorrentes das emissões veiculares de poluentes

Para valoração dos impactos decorrentes das EVP, foram empregados os valores identificados na parte da revisão bibliográfica descrita na seção 3.4.

Para o custo social do carbono (SCC), foi empregada a estimativa “Média” dentre as apresentadas na Tabela 0.26 – exceto quando explicitamente indicado diferentemente. Destaca-se que os valores foram atualizados para 2017 segundo o índice de preços da União Europeia, posto que se trata de um valor estimado com base em estimativas internacionais (neste caso específico, publicadas por Ricardo-AEA, (2014)).

Tabela 0.26: Custos sociais associados à emissão de uma tonelada de CO₂eq (SCC)

Estimativa	SCC (R\$ de 2013)	SCC (R\$ de 2017)
Baixa	101,63	104,08
Média	190,55	195,14
Alta	355,70	364,27

Fonte: Valores em R\$ de 2013 por ANTP (2018b); atualizados para R\$ de 2017 pelo autor

No que diz respeito à valoração dos impactos associados à mortalidade precoce, fora utilizadas as medianas dos valores identificados em literatura. Tais valores são sumarizados na Tabela 0.27. Por tratarem-se de estimativas tipicamente transferidas de referências internacionais para o contexto nacional, os valores foram atualizados segundo os índices de preços da União Europeia e, então, trazidos para a moeda

nacional com base no câmbio Real/Dólar Americano em 2017⁴⁸, equivalente a 3,15 BRL/USD.

Tabela 0.27: Valoração dos impactos associados à mortalidade prematura por exposição ao PM_{2.5}

Parâmetro	Valor base	Valor utilizado (valores de 2017)
VV	83,7 mil dólares (valores de 2014)	R\$ 267 mil
YLL/evento	12,3 anos	12,3 anos
VOLY	-	R\$ 21,8 mil/ano

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados diversos – Fontes individuais descritas no item 3.4.2

Para fins de análises de sensibilidade, foram também consideradas as estimativas recentemente publicadas pelo IPEA (ROCHA et al., 2019) que avaliam o valor da vida (VV) entre R\$ 2,17 milhões e R\$ 3,93 milhões – tendo sido considerada o limite inferior da estimativa (i.e., R\$ 2,17 milhões por vida perdida). Destaca-se que tal estudo foi desenvolvido no contexto de análises do custo econômico da poluição do ar no Brasil, porém sem empregar a metodologia DALY (descrita de forma sucinta na seção 3.3.2.3). A elevada variação, em relação à valoração base, enfatiza a relevância da etapa de valoração (e.g., métodos empregados, hipóteses subjacentes) para o produto final da avaliação.

H) Fórmulas para cálculo dos custos sociais médios

Para fins de análise dos cenários avaliados são empregados indicadores denominados “custos sociais médios”. A seguir, apresenta-se formalmente a forma de cálculo de cada componente de custo social apresentada. As componentes, dadas pelo oposto da variável “ $\overline{sw}_{k,m,h}$ ”⁴⁹ correspondente, são calculadas conforme as equações a seguir. Tal formulação não é relevante para o modelo analítico, mas é

⁴⁸ Consultado em <https://www.bcb.gov.br/en/currencyconversion>, em 01/11/2020, considerando a data de 02/janeiro/2017 como referência.

⁴⁹ As variáveis $\overline{sw}_{k,m,h}$ correspondem à contribuição unitária, por passageiro quilômetro, do modo m , no período h , para o Bem Estar Social (associada à dimensão k). Seu oposto ($-\overline{sw}_{k,m,h}$), por conseguinte, pode ser interpretado o custo social médio. O sinal de menos por vezes é omitido, uma vez que a variável “contribuição unitária para o Bem Estar Social” não é efetivamente utilizada nas análises, por simplicidade de notação.

apresentada formalmente para fins de compreensão das análises apresentadas no Capítulo 5.

$$-\overline{SW}_{EVP,global,car,h} = \frac{\frac{ue_{CO_2,car,h} * Y_{car,h}}{a_{car,h}} * L * SCC}{Y_{car,h} * L} \quad (0.33)$$

$$-\overline{SW}_{EVP,global,bus,h} = \frac{ue_{CO_2,bus,h} * f_{bus} * \frac{L}{\phi_{ap,h}} * SCC}{Y_{bus,h} * L} \quad (0.34)$$

$$-\overline{SW}_{EVP,local,car,h} = \left(\frac{\frac{ue_{PM_{2.5},car,h} * Y_{car,h}}{a_{car,h}} * L}{Y_{car,h} * L} \right) * \left(\frac{SW_{EVP,local,wd}}{\sum_h H_h * L * e_{PM_{2.5},h}} \right) \quad (0.35)$$

$$-\overline{SW}_{EVP,local,bus,h} = \left(\frac{\frac{ue_{PM_{2.5},bus,h} * f_{bus}}{\phi_{ap,p}} * L}{Y_{bus,h} * L} \right) * \left(\frac{SW_{EVP,local,wd}}{\sum_h H_h * L * e_{PM_{2.5},h}} \right) \quad (0.36)$$

$$-\overline{SW}_{delay,car,h} = \frac{L * \left(\frac{1}{t_{car,h}} - \frac{1}{t_{ff,car}} \right)}{Y_{car,h} * L} \quad (0.37)$$

$$-\overline{SW}_{delay,bus,h} = \frac{\left[L * \left(\frac{1}{t_{bus,h}} - \frac{1}{t_{ff,bus}} \right) + \left(\frac{\gamma_w}{2 * f_{bus}} - \frac{\gamma_w}{2 * 15} \right) \right]}{Y_{bus,h} * L} \quad (0.38)$$

nas quais,

$\overline{SW}_{k,m,h}$: contribuição média (ou unitária) ao Bem Estar Social, por passageiro*quilômetro, do modo m , no período h , associada à dimensão k do Bem Estar Social $\left[\frac{R\$}{PKM} \right]$ ⁵⁰;

⁵⁰ Para fins de exemplificação, $\overline{SW}_{EVP,global,car,h}$ representa a contribuição média (ou unitária) ao Bem Estar Social, por passageiro*quilômetro, do modo “car”, no período h , associada aos impactos globais das EVP $\left[\frac{R\$}{PKM} \right]$.

Nas equações acima, o custo social médio corresponde ao custo total correspondente ao respectivo modo e período dividido pela demanda associada, em passageiros*quilômetro – i.e., os termos $Y_{m,h} * L$, que foram mantidos nas equações mesmo quando possível eliminá-los por simplificação algébrica, a fim de facilitar sua compreensão.

No caso dos custos associados a emissões de GEE (equações (0.33) e (0.34)), o custo total por período e por modo corresponde ao produto entre o fluxo veicular, a distância total percorrida, as emissões unitárias por quilômetro (todos associados ao respectivo período e modo) e o custo social do carbono. No caso dos custos associados à mortalidade prematura (equações (0.35) e (0.36)), o custo total por período é calculado pela multiplicação das emissões totais pelo modo m no período h , calculado no primeiro termo entre parênteses, pelo custo médio das emissões de $PM_{2.5}$ (único poluente associado à mortalidade no presente modelo), dado pelo segundo termo entre parênteses e comum às equações dos dois modos.

No caso dos custos associados ao atraso (equações (0.37) e (0.38)), uma vez que cada modo trafega por faixas de tráfego exclusivas, seu cálculo é feito independentemente por modo, considerando que apenas os usuários de dado modo produzem atrasos sobre os demais usuários do mesmo modo. Trata-se de uma simplificação que, ainda assim, permite mensurar o grau de congestionamento (ou saturação) sob o qual o modo opera em cada contexto.

Para usuários de TIA, seu cálculo é dado pela diferença entre o tempo de viagem corrente ($L * \left(\frac{1}{t_{car,h}} \right)$) e o tempo de viagem em fluxo livre ($L * \left(\frac{1}{t_{ff,car}} \right)$). Para usuários de TCO, por sua vez, seu cálculo contempla esta mesma componente (relativa ao tempo de viagem dentro dos veículos), além de uma componente adicional associada ao tempo de espera (relativa à parcela da viagem que ocorre fora do veículo) – parcela do atraso na qual manifestam-se as economias de densidade presentes no TCO à medida que a demanda cresce, reduzindo-a.

Para fins de valoração, uma vez que o tempo médio de espera em fluxo livre (calculado como metade do inverso da frequência dos serviços) não é definido, foi arbitrado como tempo de espera de referência o correspondente a uma frequência de 15 ônibus/hora (i.e., 2 minutos). Trata-se de uma frequência já elevada, mas que fora

arbitrada nesse patamar para tornar-se comparável às frequências do corredor de ônibus em análise. Destaca-se que esta premissa não afeta as conclusões apresentadas a seguir, uma vez que apenas representa a adição de um termo constante no cálculo do atraso incidente sobre usuários de ônibus e as análises são desenvolvidas comparativamente ao cenário Base.

I) Alteração nos parâmetros operacionais do sistema de transporte coletivo por ônibus com eletrificação da frota

A representação dos efeitos da eletrificação da frota foi baseada nos custos reportados pela *Cost and Emissions Appraisal Tool for Transit Buses* (Ferramenta de Avaliação de Custos e Emissões para Ônibus de Transporte Coletivo, em tradução livre), publicado pelo WRI (COOPER et al., 2019). A publicação reporta valores médios para a operação de sistemas de TCO no contexto brasileiro utilizando-se diferentes tecnologias veiculares.

A abordagem empregada consiste em comparar os custos unitários (e.g., por quilômetro percorrido; por veículo adquirido) dentre as tecnologias veiculares “à diesel” e “elétrico”. Com base na relação entre os custos unitários para cada tecnologia, obtêm-se fatores para conversão dos custos – i.e., de custos associados a veículos à diesel para custos associados a veículos elétricos. O processo efetivo de cálculo é ilustrado na sequência dessa seção.

Os dados de entrada utilizados são apresentados na Tabela 0.28. Os cálculos são baseados em veículos de 12 metros, posto que são os únicos apresentados tanto em sua variação elétrica quanto em sua variação à diesel. No caso das emissões, são reportados valores correspondentes à tecnologia Euro V (que, todavia, não afetam os resultados, conforme evidenciado adiante).

Tabela 0.28: Parâmetros associados a veículos de diferentes tecnologias veiculares⁵¹

Parâmetro	Veículo a diesel	Veículo elétrico
Taxas médias de EVP		
Material particulado (g/km)	0,02	-
Dióxido de carbono (g/km)	2603	-
GEE na cadeia de produção (g/km)	-	179
Aquisição da frota		
Valor de compra (mil \$/ônibus)	215	537,5
Vida útil (anos)	10	15
Valor residual (% do valor de compra)	10	5
Pagamento de entrada (% do valor de compra)	30	20
Taxa de juros do empréstimo (% a.a.)	9,9	9,4
Período de financiamento (anos)	9	14
Desempenho operacional		
Uso de energia (kWh/km)	-	1,3
Custo de energia (\$/kWh)	-	0,215
Consumo de combustível (L/100km)	45	-
Custo do combustível (\$/L)	1,43	-
Custo energético por quilômetro* (\$/km)	0,64	0,28
Manutenção anual		
Custo anual fixo de manutenção (mil \$/ano)	12,9	7,31
Custo da frota – Ciclo de 30 anos*		
Desembolso total ⁵² (mil \$/ônibus)*	603	966

Fonte: Cooper et al. (2019)

*calculado pelo autor com base nos valores apresentados

Com base nos valores apresentados, foram calculados os referidos por “fatores de conversão de custos”. Seu emprego consiste em multiplicar os custos unitários associados a veículos à diesel, tal qual utilizado no modelo analítico, de modo a representar seu equivalente no caso do emprego de ônibus elétricos. Calculou-se,

⁵¹ Os custos são fornecidos em dólares na publicação original, sem especificação clara da data-base dos valores. Com são calculados os valores relativos entre os custos da frota eletrificada e os custos da frota movida à diesel, não há prejuízo às conclusões.

⁵² Soma dos custos de aquisição, distribuídos no tempo conforme as condições de pagamento apresentadas, e dos custos de manutenção anual. Apresentado em Valor Presente Líquido, considerando uma taxa de desconto de 6% a.a. (ao ano).

portanto, fatores de conversão de custos para os custos quilométricos, para os custos horários e para os custos do sistema.

No caso dos custos horários, considerou-se que não haveria alteração relevante sobre os custos de mão-de-obra operacional (principal componente dos custos horários) e, portanto, não se alterou tal componente (i.e., fator de conversão de custo = 1). No caso dos custos quilométricos, comparou-se os custos energéticos por quilômetro, tal qual apresentado na Tabela 0.28. No caso dos custos do sistema, comparou-se os custos associados à frota em um ciclo de 30 anos (por ser o mínimo múltiplo comum dos períodos de vida útil de cada tipo de veículo), analogamente.

No caso das EVP, foi empregada lógica similar. Nota-se, na Tabela 0.28, que as emissões de CO₂ e PM atribuídas aos veículos elétricos são nulas. A publicação reporta emissões associadas à cadeia produtiva da energia elétrica (*upstream emissions*, em tradução livre), porém não se contemplou esta parcela no cômputo das emissões por veículos elétricos, uma vez que estas não constam nas estimativas de EVP para os veículos à diesel (e.g., das etapas da cadeia produtiva, oriundas da evaporação de combustíveis). Ademais, a publicação original (COOPER et al. 2019) não especifica a matriz energética considerada na estimativa das “*upstream emissions*” reportadas.

No que diz respeito ao PM, considerou-se que as emissões pelo escapamento seriam nulas no cenário com frota elétrica, restando apenas a parcela não emitida pelo escapamento – calculada com base nos valores apresentados na Tabela 0.23 e equivalente a 52% ($1 - \phi_{PM}$) das emissões totais de material particulado.

Os fatores de conversão efetivamente empregados (já apresentados na Tabela 5.1) são apresentados na Tabela 0.29:

Tabela 0.29: Fatores de conversão para representação de frota elétrica na operação do TCO

Parâmetro	Unidade do parâmetro	Fator multiplicativo (relativo aos parâmetros de veículos do ciclo diesel)
Custos quilométricos (C_q)	$\frac{R\$}{\hat{n}ibus * km}$	43%
Custos horários (C_h)	$\frac{R\$}{\hat{n}ibus * hora}$	100%
Custos do sistema (C_s)	$\frac{R\$}{\hat{n}ibus * hora_{pico}}$	160%
Emissões unitárias de Dióxido de Carbono ($ue_{bus,CO_2,h}$)	$\frac{g}{VKM}$	0%

Parâmetro	Unidade do parâmetro	Fator multiplicativo (relativo aos parâmetros de veículos do ciclo diesel)
Emissões unitárias de Material Particulado ($ue_{bus,PM_{2.5},h}$)	$\frac{g}{VKM}$	52%

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em COOPER et al. (2019)

J) Construção do cenário com demanda reduzida

Na construção do cenário com demanda reduzida, considerou-se uma redução de demanda de 30% em relação à demanda do cenário base (nos períodos Pico e Fora-Pico). As constantes específicas das alternativas do nível superior e do Fora-Pico foram recalculadas para tornarem-se consistentes com os novos custos de viagem, em abordagem análoga à descrita na seção Apêndice: E). Os demais parâmetros do modelo permaneceram inalterados. Os resultados obtidos para o cenário Base-dr (como em “demanda reduzida”) são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 0.30: Resumo dos parâmetros para representação da demanda – Cenário base-dr

Informação	Unidade	Valor
y_p	pax/h/10km	10.380
y_o	pax/h/10km	5.100
$\theta_{b,o}$	R\$/10km/h	-6,9
θ_p	R\$/10km/wd	23,9
θ_o	R\$/10km/wd	25,4
p_{nt}	%	22,3%
p_p	%	33,9%
p_o	%	43,8%
Y_p	pax/dia/10km	83.041
Y_o	pax/dia/10km	107.105
Y_{nt}	pax/dia/10km	54.586
Y_{tot}	pax/dia/10km	244.732

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 0.31: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base-dr, no período Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados

Informação	Unidade	Valor
$y_{car,p}$	pax/10km/h	5.920
$y_{bus,p}$	pax/10km/h	4.460
$f_{bus,p}$	ônibus/h	52
$t_{car,p}$	h/km	1/13,4
$t_{boa/ali,p}$	seg/km	44

Informação	Unidade	Valor
$t_{stop,p}$	seg/km	30
$t_{bus,p}$	h/km	1/24,8
$t_{bus,p} + t_{boa/ali,p} + t_{stop,p}$	h/km	1/16,4
$t_{w,p}$	seg/10km	34,5
t_a	seg/10km	305
$CVG_{car,p}$	R\$/10km	15,4
$CVG_{bus,p}$	R\$/10km	7,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 0.32: Cálculo das componentes do custo generalizado de viagem por modo, no cenário base-dr, no período Fora-Pico, a partir das equações do modelo analítico – Valores calculados

Informação	Unidade	Valor
$y_{car,o}$	pax/10km/h	3.007
$y_{bus,o}$	pax/10km/h	2.093
$f_{bus,o}$	ônibus/h	46
$t_{car,o}$	h/km	1/34,3
$t_{boa/ali,o}$	seg/km	34
$t_{stop,o}$	seg/km	14
$t_{bus,o}$	h/km	1/24,8
$t_{bus,o} + t_{boa/ali,o} + t_{stop,o}$	h/km	1/18,6
$t_{w,o}$	seg/10km	38,9
t_a	seg/10km	305
$CVG_{car,o}$	R\$/10km	8,9
$CVG_{bus,o}$	R\$/10km	4,8

Fonte: Elaborado pelo autor