FELIPE FERREIRA DIAS

Contribuições ao Estudo de Implantação de Pedágio Urbano em São Paulo

São Paulo

2015

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, 28 de maio de 2015

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Dias, Felipe Ferreira
Contribuições ao Estudo de Implantação de Pedágio Urbano em São Paulo / F. F. Dias -- versão corr. -- São Paulo, 2015.
160 p.

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

1.Pedágios 2.Demanda (Modelagem) 3.Sistemas de transportes (Capacidade) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

FELIPE FERREIRA DIAS

Contribuições ao Estudo de Implantação de Pedágio Urbano em São Paulo

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador:
Prof. Dr. Nicolau Dionísio Fares Gualda

São Paulo

2015

A todos aqueles que já sofreram com o trânsito

AGRADECIMENTOS

Reservo este espaço para fazer os devidos agradecimentos a todos aqueles que me auxiliaram direta ou indiretamente durante a elaboração deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço a você, leitor, por se interessar não só por este tema e por este estudo, mas também por se dar ao trabalho de ler esta seção.

Eu gostaria de agradecer a todos os músicos que me acompanharam durante as horas de leitura, pesquisa, desenvolvimento e escrita. Sem a cafeína sonora de Dubmood, Anamanaguchi, Random, _ensnare_, Savant, Ultrasyd, DJ Cutman e diversos outros, é certo que minhas madrugadas teriam sido muito mais difíceis.

Agradeço aqui também ao Professor Jaime Waisman e Engenheiro Gabriel Feriancic, que, além de auxiliarem o meu estudo com seus comentários, possibilitaram a flexibilidade da qual gozei na SISTRAN por grande parte do tempo em que elaborei a presente dissertação.

Sou agradecido ao LPT - Laboratório de Planejamento e Operação de Transportes por sempre fornecer a infraestrutura necessária para os meus estudos.

Agradeço também ao CNPq, principalmente pelo apoio financeiro prestado durante o meu afastamento da SISTRAN. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

Agradeço profundamente ao Engenheiro Eduardo Alcântara de Vasconcellos por aceitar participar da banca examinadora do meu Exame de Qualificação.

É indispensável um enorme agradecimento ao Professor Claudio Barbieri da Cunha, que sempre recebeu este aluno cheio de dúvidas, mesmo nas horas mais inconvenientes.

Sou profundamente agradecido também ao Professor Orlando Strambi, não só por auxiliar os meus estudos com novas referências e ideias, mas também por ser tão paciente com as minhas perguntas e dificuldades e por ainda aceitar participar da banca examinadora do meu Exame de Qualificação.

É imensurável o quanto tenho a agradecer ao Professor Nicolau Dionísio Fares Gualda por me aceitar como seu orientando, por ser tão compreensível e por dar direções claras sobre o meu trabalho.

Faço questão de exaltar o apoio que tive a todos os momentos dos meus colegas e amigos, sempre interessados no meu tema. Mas mais do que tudo isso, essas pessoas especiais sempre estiveram dispostas a me ajudar quando foi necessário. Sem vocês, esse trabalho não aconteceria. Obrigado por sempre estarem do meu lado.

Fico quase sem palavras ao tentar agradecer à Francesca, o amor da minha vida, por todo o seu carinho e apoio. Você certamente foi a minha inspiração e a minha motivação para a conclusão desse trabalho. Obrigado, meu amor.

Por fim, reservo-me ao direito de escrever à minha família na língua que me é mais confortável:

I cannot express how thankful I am to all of you. Mom, Dad, Luiz and Leo, you all have helped me so much with your unconditional love, support and understanding. I owe you everything. Thank you for helping me along the path to becoming the person I am today and for making this project possible. I love you with all my heart.

"I believe that scientific knowledge has fractal properties; that no matter how much we learn, whatever is left, however small it may seem, is just as infinitely complex as the whole was to start with. That, I think, is the secret of the Universe."

"Eu acredito que o conhecimento científico tenha propriedades fractais; que apesar de o quanto aprendamos, aquilo que resta, independentemente do quão pequeno possa parecer, é tão infinitamente complexo quanto o todo era a princípio. Esse, acho eu, é o segredo do Universo."

Isaac Asimov

RESUMO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) sofre de sérios problemas de congestionamento, assim como muitas outras cidades de grande porte. Uma possível solução, proposta por pesquisadores de transportes, economia e ciências ambientais, é a implantação de um sistema de *congestion charging,* chamada no Brasil de pedágio urbano.

Um dos objetivos do presente trabalho foi estabelecer os conceitos relacionados a este assunto e ilustrar as principais questões relacionadas à sua implantação. Espera-se que este trabalho possa auxiliar o desenvolvimento de estudos de avaliação da viabilidade e de impactos de sistemas propostos de *congestion charging*.

Para atingir este objetivo, toca-se em diversos assuntos, como a definição de congestionamento e as formas de medi-lo, a base conceitual e teórica dos sistemas de *congestion charging* e seus diversos esquemas de diferenciação. São expostas também as medidas de mitigação de congestionamento que já foram implantadas na RMSP, quais foram os estudos já desenvolvidos considerando este tipo de política para a RMSP, e casos em que sistemas de *congestion charging* já foi implantado.

Neste trabalho, desenvolveu-se também um modelo de escolha discreta a partir dos dados da Pesquisa Origem e Destino 2007 do METRÔ, onde pessoas deveriam escolher entre "Transporte Coletivo" e "Transporte Público". Este modelo foi utilizado para avaliar o potencial de impacto na divisão modal e de arrecadação de um *congestion charge* aplicado ao centro expandido de São Paulo. Adverte-se, porém, que os resultados obtidos são meramente ilustrativos.

Mostra-se, também, que é possível avaliar a capacidade ociosa do sistema de transporte coletivo a partir dos dados disponíveis de bilhetagem e de GPS dos ônibus. Este processo é exemplificado através do cálculo de capacidade de uma única viagem de um único ônibus, dada a dificuldade de automatização deste processo para abranger toda a frota.

Palavras-chave: pedágio urbano, gestão de demanda por transportes, congestionamento urbano, precificação do congestionamento, tarifação do congestionamento, *congestion charging*, *congestion pricing, congestion tax*, capacidade de sistemas de transporte, AVL, AFC, GTFS

ABSTRACT

The São Paulo Metropolitan Region (SPMR) suffers from severe traffic congestion, as do many other large-scale urban areas around the world. A possible solution to this issue, which has been suggested by transportation, economics and environmental researchers, is the implementation of a congestion charging system.

One of the objectives of this project is to establish clear concepts and shed light on the main issues regarding these systems by means of a comprehensive literary review. It is expected that this project may help the development of in-depth studies carried in order to evaluate the viability and impacts of congestion charging proposals.

In order to achieve this goal, many subjects are addressed, such as the definition of congestion, how it's measured, the theoretical backgrounds that support congestion charging schemes, their different degrees of differentiation, which policies were enacted in order to reduce traffic congestion in São Paulo, what considerations and studies have already been developed for Brazil and São Paulo regarding these systems and where have these systems been successfully installed.

Later chapters deal with another goal of this project: estimating how a congestion charging system would affect SPMR. This was achieved through a multinomial logit model, where decision-makers choose between "Public Transportation" and "Private Automobile". The results presented at this phase are merely indicative of certain tendencies and should not be considered final.

This project also attempts to show that given the available Automated Fare Collection (AFC) data and Automated Vehicle Location (AVL) data, it is possible to estimate the current public transportation system's unused capacity. The author shows this by calculating the capacity of one bus trip using these data, but also explains the difficulties of expanding this analysis to the whole of SPMR's public transportation system.

Keywords: urban traffic congestion, travel demand management, transportation demand management, congestion charging, congestion pricing, congestion tax, transportation system capacity, AVL, AFC, GTFS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ciclo vicioso dos transportes urbanos 26
Figura 2.2 - Gráfico dos custos e da demanda pelo uso do automóvel 28
Figura 2.3 Exemplo de curvas de resposta de uma via 29
Figura 2.4 Exemplo para diferenças entre sistemas de Zonas e de Cordões 33
Figura 2.5 Relação de preços e faixas horárias do sistema de *congestion charging* de Estocolmo 36
Figura 2.6 Produção científica encontrada com os termos "*congestion charging*" e "*congestion pricing*" na base digital da *Science Direct* 38
Figura 2.7 Aceitabilidade e apoio a sistemas de *congestion charging* 39
Figura 2.8 Histórico de velocidades de São Paulo - 1993 a 2004 - Tarde - Sentido Centro-Bairro 44
Figura 2.9 Histórico de velocidades de São Paulo - 1993 a 2007 - Tarde - Sentido Centro-Bairro 44
Figura 2.10 Área de restrição do Rodízio de automóveis em São Paulo 46
Figura 2.11 Zona de Máxima Restrição de Fretamento 47
Figura 2.12 Vias atingidas pela restrição à circulação de caminhões 48
Figura 2.13 Divisão modal resultante nas simulações das Estratégias de Referência (B05, R25, M25) e Estratégia Combinada sem e com o pedágio urbano (S25 e SP5) 50
Figura 2.14 Velocidades médias inclusive com pedágio urbano 50
Figura 3.1 Fronteira (tipo cordão) do sistema de Estocolmo abrangendo as 18 pontes conectando as ilhas centrais 57
Figura 3.2 Média de travessias pelo cordão em dias da semana entre 6h e 19h de 2005 a 2011 59
Figura 3.3 Área de tarifação do *London Congestion Charge* com indicação da área original e expansão oeste. 61
Figura 3.4 Formas de pagamento da tarifa em Londres 62
Figura 3.5 Sinalização vertical e horizontal indicando zona tarifada em Londres 62
Figura 3.6 Área tarifada em Cingapura 64
Figura 3.7 Efeitos do ERP em Cingapura 6 anos após a sua implantação 65
Figura 4.1 Esquema de monitoração usado em Londres 69
Figura 4.2 Sistema de zonas no Centro Expandido de São Paulo 70

Figura 4.3 Sistema de cordão envolvendo o centro expandido de São Paulo 72
Figura 4.4 Sistema de vias específicas – Av. 23 de Maio 73
Figura 5.1 Metodologia da etapa de modelagem de escolha discreta 76
Figura 5.2 Metodologia da etapa de estudo de capacidade 77
Figura 6.1 Zoneamento da Região Metropolitana de São Paulo 83
Figura 6.2 Sequência de filtros aplicados e bancos de dados intermediários gerados 84
Figura 6.3 Tipos de viagem e cálculos para determinação da hora pico 89
Figura 6.4 Gráfico para definição da hora pico 89
Figura 6.5 Macrozonas usadas na Pesquisa OD do METRÔ de 2007 91
Figura 6.6 Mapa de calor de viagens - Matriz OD da Hora Pico da Manhã 93
Figura 6.7 Linhas de desejo da Hora Pico da Manhã 95
Figura 6.8 Representação das rotas da Hora Pico da Manhã 96
Figura 6.9 Histograma da variável "Renda Familiar" 105
Figura 6.10 Viagens que passam pelo centro expandido 113
Figura 6.11 Viagens TC em função do valor cobrado 115
Figura 6.12 Viagens TI em função do valor cobrado 115
Figura 6.13 Divisão modal TC em função do valor cobrado.....116
Figura 6.14 Divisão modal TI em função do valor cobrado 116
Figura 6.15 Passageiros TI deslocados em função do valor cobrado 117
Figura 6.16 Arrecadação (R$) em função do valor cobrado.....117
Figura 6.17 Mapa da linha 847P-10 – Terminal Pirituba – Itaim Bibi 123
Figura 6.18 (a) Carregamento da linha 847P-10; (b) Vagas disponíveis da linha 847P-10 124
Figura 6.19 Segmentação do GTFS 126
Figura 6.20 Desencontro entre pontos de ônibus e traçado da linha 127
Figura 6.21 Sinal de GPS cadastrado em linhas erradas 128
Figura 6.22 Exemplo para inferência do local de desembarque 131
Figura 6.23 Inferência do local de desembarque 131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Relação de preços e faixas horárias do sistema de *congestion charging* de Estocolmo 35
Tabela 2.2 Relação entre dias da semana e placas proibidas de circular no centro expandido 46
Tabela 3.1 Relação de preços e faixas horárias do sistema de *congestion charging* de Estocolmo 58
Tabela 6.1 Relação entre Modo Principal da OD 2007 e classificações TI/TC utilizadas 83
Tabela 6.2 Resumo da sequência de filtros aplicados ao banco de dados da OD 2007 86
Tabela 6.3 Matriz de Origens e Destinos entre as Macrozonas da RMSP 92
Tabela 6.4 Tarifas de embarque em 2007 98
Tabela 6.5 Matriz tarifária para integração 98
Tabela 6.6 Simplificação do banco de dados da OD 2007 100
Tabela 6.7 Banco de dados simplificado preenchido 101
Tabela 6.8 Relação das variáveis utilizadas 102
Tabela 6.9 Categorias das variáveis categóricas 103
Tabela 6.10 Simplificação do banco de dados utilizado 104
Tabela 6.11 Sumário estatístico da variável "Renda Familiar" 105
Tabela 6.12 Coeficientes dos modelos 1 e 2 108
Tabela 6.13 Resultados globais dos modelos 111
Tabela 6.14 Valores médios de custo e tempo e influência média na utilidade representativa 111

LISTA DE SIGLAS

ALS – Area Licensing Scheme

AFC – Automated Fare Collection

AVL – Automated Vehicle Location

CBD – Central Business District

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego

ERP – Electronic Road Pricing System

EUA – Estados Unidos da América

FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia

FGV – Fundação Getúlio Vargas

FHWA – Federal Highway Administration

GPS – Global Positioning System

HOT Lane – High Occupancy Toll Lane

HOV Lane – High Occupancy Vehicle Lane

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development

PPP – Parceria público privada

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

RZ – Restricted Zone

SPTrans – São Paulo Transporte S.A.

TfL – Transport for London

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 21

1.1 Objetivos 21

1.2 Descrição dos capítulos 21

2 REVISÃO DA LITERATURA 23

2.1 Congestionamento 23

2.1.1 Introdução 23

2.1.2 Definições técnicas e medições 24

2.1.3 Mitigação de congestionamentos 25

2.2 *Congestion Charging e Congestion Pricing* 27

2.2.1 Apresentação conceitual 27

2.2.2 Diferenciação e precificação 31

2.2.3 Dificuldades 37

2.2.4 Questões gerais a serem tratadas 41

2.2.5 Congestion charging como parte de um plano maior 42

2.3 O congestionamento em São Paulo 43

2.4 Políticas para redução de congestionamento em São Paulo 45

2.4.1 Rodízio 45

2.4.2 Restrição para os ônibus fretados 46

2.4.3 Restrição de caminhões 47

2.5 *Congestion charging* no Brasil e em São Paulo 48

2.5.1 Política Nacional de Mobilidade Urbana 49

2.5.2 Plano Integrado de Transportes Urbanos 2025 49

2.5.3 SP 2040 – A Cidade que Queremos 51

2.5.4 Revista Movimento 51

2.5.5 Boletins FDTE 52

2.5.6 Outros estudos 52

2.6 Consolidação de conceitos e resumo 53
2.6.1 Principais benefícios..... 53
2.6.2 Principais dificuldades 54
2.6.3 Medidas conjuntas 54
2.6.4 Perguntas frequentes 55
3 CASOS INTERNACIONAIS 57
3.1 Estocolmo..... 57
3.2 Londres 60
3.3 Cingapura..... 63
3.4 Comentários finais 65
4 ALTERNATIVAS PARA SÃO PAULO 67
4.1 Sistema de zonas..... 70
4.2 Sistema de cordão 71
4.3 Sistema de vias específicas..... 73
5 METODOLOGIA..... 75
5.1 Modelo de escolha discreta..... 76
5.2 Estudo de capacidade do sistema de Transporte Coletivo 77
5.2.1 Conceitos de vaga quilômetro e ociosidade..... 78
6 APLICAÇÃO PARA O CASO DE SÃO PAULO 81
6.1 Modelo de escolha discreta..... 81
6.1.1 Montagem do banco de dados para estimação..... 81
6.1.2 Descrição da base final.....101
6.1.3 Formas funcionais testadas.....106
6.1.4 Estimação dos modelos.....107
6.1.5 Introdução de sistema de congestion charging 112
6.1.6 Comentários e limitações das projeções 118
6.2 Estudo de capacidade do sistema de Transporte Coletivo 119

6.2.1 Dados disponíveis 119

6.2.2 Descrição dos dados 120

6.2.3 Avaliação de capacidade para uma viagem da linha 847P-10 122

6.2.4 Scripts desenvolvidos em Python 125

6.2.5 Comentários sobre o estudo de capacidade 131

7 CONCLUSÕES 133

7.1 *Congestion charging* como política pública 133

7.2 Estimativas 133

7.3 Avaliação da capacidade do transporte público coletivo da RMSP 134

7.4 Trabalhos futuros 134

7.5 Disponibilização de dados e transparência 135

REFERÊNCIAS 137

APÊNDICE A – MODELOS DE ESCOLHA DISCRETA 143

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS DADOS 155

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

A presente dissertação visa a auxiliar os estudos referentes à implantação de sistemas de *congestion charging* (pedágio urbano), especialmente no caso de São Paulo. Buscou-se levantar as principais questões técnicas e sociais relativas ao tema, elaborar perguntas a serem respondidas por políticos e gestores e explicitar os principais estudos e casos onde sistemas semelhantes foram implantados.

Quando possível, buscar-se-á também dar indicativos de opções mais desejáveis para a Região Metropolitana de São Paulo.

Outro objetivo é inferir sobre como a implantação de um sistema desses afetaria o comportamento das pessoas e se o sistema de transporte público coletivo possui capacidade compatível com a elevação da demanda.

1.2 Descrição dos capítulos

O capítulo 2 é onde se encontra a revisão da literatura. Nele, levantam-se os principais dados e estudos referentes a sistemas de *congestion charging*. Nesse capítulo discute-se a definição de congestionamento, as formas de mitigá-lo, conceituam-se os sistemas de *congestion charging*, são explicitados os seus principais detalhes, são expostas as medidas de redução de congestionamento já implantadas em São Paulo e, por fim, são apresentados documentos de estudos oficiais com simulações ou discussões de sistemas de *congestion charging* no Brasil e em São Paulo.

No capítulo 3 são analisadas três das principais cidades onde foram instalados sistemas de *congestion charging*: Estocolmo (Suécia), Londres (Reino Unido) e Cingapura.

No capítulo 4 são elencadas três alternativas para um sistema de *congestion charging* em São Paulo – sistemas de zonas, de cordão e de vias específicas – e detalham-se os passos a serem tomados para a sua implantação.

O capítulo 5 apresenta toda a metodologia na qual a avaliação de sistemas de *congestion charging* será baseado. Apresenta-se também a metodologia na qual se baseará a avaliação da capacidade do sistema de Transportes Coletivos da RMSP.

Ao longo do capítulo 6 desenvolve-se um modelo de escolha discreta entre os modos “Transporte Coletivo” e “Transporte Individual”, estimado a partir de dados da Pesquisa Origem e Destino 2007 do METRÔ. Após a criação do modelo, são avaliados diversos cenários de sistemas de *congestion charging* e o impacto que trariam para o sistema de Transporte Coletivo. Busca-se, também, uma forma de calcular a capacidade do sistema de Transporte Coletivo da RMSP com base nos dados de bilhetagem da RMSP e de GPS dos ônibus da SPTrans.

O capítulo 7 contém as principais conclusões extraídas e possíveis trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências utilizadas para a confecção da presente dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita a revisão da literatura de sistemas de *congestion charging* e tópicos associados, como o congestionamento. São estudados documentos e relatórios oficiais, artigos científicos e também artigos de jornais e revistas.

2.1 Congestionamento

Nesta seção são tratados elementos relacionados ao congestionamento, como definições técnicas e formas de reduzi-lo.

2.1.1 Introdução

É raro encontrar afirmações peremptórias na literatura científica. No entanto, uma organização pertencente à OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), em uma publicação sobre gestão de congestionamentos urbanos (European Conference of Ministers of Transport, 2007), afirma que “regiões urbanas que sejam dinâmicas, com preços acessíveis, habitáveis e atrativas nunca estarão livres de congestionamento” (tradução nossa).

No mesmo documento, sugere-se que as políticas de transporte devam buscar o gerenciamento do congestionamento com uma base custo-efetiva e com o foco em redução do fardo que congestionamentos excessivos impõem àqueles que utilizam a malha urbana.

Em São Paulo, o congestionamento no sistema de transportes causa uma perda anual de cerca de R$ 50 bilhões (Cintra, 2012). A cifra elevada é duramente questionada por Eduardo Vasconcellos, que sugere que os reais custos estejam próximos a R$ 7 bilhões ao ano (Rocha, 2013).

Independente de qual a metodologia utilizada para realizar o cálculo do custo do congestionamento, fica evidente que esta perda representa uma fração substancial do PIB paulistano, igual a R$ 443,6 bilhões em 2010 (São Paulo, 2010).

2.1.2 Definições técnicas e medições

Em um estudo sobre as diferentes formas de medir o congestionamento (Bertini, 2006), aponta-se que a definição fornecida pela *Federal Highway Administration* (FHWA) mostra-se bastante subjetiva: “o nível em que a performance do sistema de transportes não seja mais aceitável devido à interferência do tráfego” (tradução nossa). Além disso, a definição se mostra ser variável em função do tipo do sistema em questão e de eventuais sazonalidades: “o nível de performance do sistema pode variar por tipo de sistema, sua localização geográfica (área metropolitana, subárea ou área rural) e/ou pela hora do dia" (Bertini, 2006) (tradução nossa). O autor também indica que inúmeros órgãos públicos americanos (tanto estaduais quanto municipais) definem o congestionamento de formas diferentes.

Algumas definições do congestionamento baseiam-se em parâmetros técnicos mensuráveis. Algumas dessas medidas incluem:

- Diferença entre velocidade de fluxo livre e velocidade observada;
- Diferença entre velocidade limite permitida e velocidade observada;
- Diferença entre tempo de travessia de determinado trecho na situação de fluxo livre e na situação observada;
- Tamanho de fila;
- Índice de volume sobre capacidade da via (V/C);
- Número de paradas em um determinado trecho.

Pode-se definir congestionamento como sendo “a presença de atrasos ao longo de uma via devido à presença de outros usuários” (Kockelman, 2003) (tradução nossa).

Existem organizações que medem congestionamentos com base em: atrasos totais anuais impostos a viajantes de automóveis, combustível "desperdiçado" em congestionamentos, a comparação entre os tempos de travessia em situação de fluxo livre e no pior dia de congestionamento do mês (Schrank, Eisele e Lomax, 2012).

Além disso, pode-se ir adiante e definir dois tipos de congestionamentos (Stopher, 2004):

- Recorrentes: acontecem no mesmo lugar, na mesma hora, dia após dia, em especial nos dias de semana;

- Não recorrentes: surgem em condições temporárias, tais como acidentes, obras ou quebra de veículos na pista.

A agência de transportes de Londres define congestionamento como sendo a média de tempo perdido sentida pelos usuários dos veículos em uma malha viária. Este "tempo perdido" é definido como o tempo gasto adicionalmente em uma viagem quando comparado com uma condição de fluxo livre. Também é sugerido que os congestionamentos sejam medidos em termos de "taxas de viagem" (unidades de tempo por unidades de distância), ao invés das velocidades propriamente ditas (Transport for London, 2003a).

Há debate acerca da medição de congestionamento por meio de comparação com uma situação de fluxo livre (Prud'homme e Bocarejo, 2005): a situação ótima não se passa com vias em fluxo livre – isso representaria uma subutilização da infraestrutura viária. Argumenta-se que "vias urbanas não foram construídas para oferecer velocidades de fluxo livre 24 horas ao dia, [...] 365 dias por ano. Pelo mesmo motivo, as políticas de gestão do congestionamento também não devem buscar este fim" (European Conference of Ministers of Transport, 2007) (tradução nossa).

Existem autores que discutem a ideia de que o congestionamento nada mais é do que uma solução a outro problema: o excesso de demanda por bens escassos (nesse caso, espaço viário) em horários de pico (Downs, 2004).

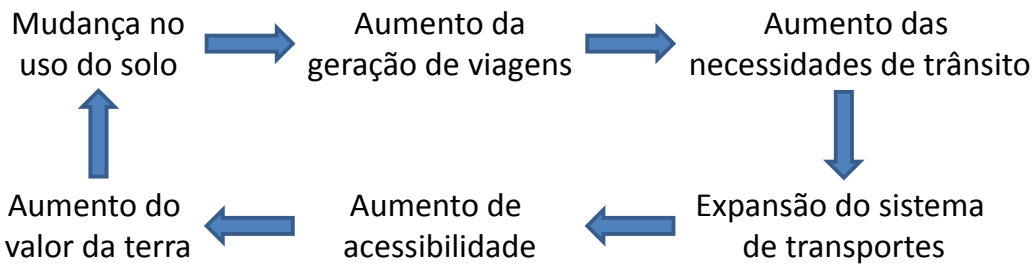
Apesar dessa aparente dificuldade técnica em relação à sua definição formal, os indivíduos que utilizam os sistemas de transportes conseguem facilmente reconhecer e identificar sistemas congestionados. É um caso do "*I know it when I see it*".

2.1.3 Mitigação de congestionamentos

A forma mais tradicional de mitigar o problema do congestionamento urbano é a expansão ou aumento da capacidade da malha viária. No entanto, promover única e exclusivamente este tipo de alteração no sistema viário faz com que se recaia no ciclo vicioso do transporte urbano, ilustrado na Figura 2.1 (Paquette, Ashford e Wright, 1972 apud Gualda, 1994). Este ciclo indica que ao aumentar as capacidades

das vias (ou simplesmente abrir novas vias), estimulam-se alterações no uso do solo que acarretam na reincidência de congestionamentos. Desta forma, os reais motivos do congestionamento não são tratados.

Figura 2.1 Ciclo vicioso dos transportes urbanos



Fonte: (Paquette, Ashford e Wright, 1972 apud Gualda, 1994) (tradução nossa).

Diversos estudos indicam que expansões do sistema viário por si só não trarão a solução para o problema do congestionamento. Elas são, no entanto, parte da solução. Podem-se apontar cinco estratégias para a gestão do congestionamento (Litman, 2013):

- Expansão do sistema viário;
- Melhorias nos modos alternativos de transporte;
- Reformas nos sistemas de precificação e tarifação;
- *Smart growth* ("crescimento inteligente", traduzindo literalmente);
- Programas de gestão de demanda;

O Departamento de Transportes dos EUA define *Travel Demand Management* como sendo não uma ação, mas sim um conjunto de ações ou estratégias cujos objetivos sejam encorajar viajantes a utilizar alternativas a viajar sozinho, especialmente nos horários mais congestionados do dia (Comsis Corporation *et al.*, 1993).

Há autores que apontam TDM como sendo uma ação ou conjunto de ações que visam influenciar o comportamento de viagem das pessoas de tal forma a apresentar formas alternativas de mobilidade e/ou reduzir congestionamentos (Meyer, 1999).

Outros autores ditam que *Travel Demand Management* pode ser definido como um conjunto diversificado de estratégias de transportes que, coletivamente, promovam o

uso efetivo, eficiente e equitativo de recursos existentes e renováveis (Rivasplata, 2013).

Dentre as reformas no sistema de tarifação e os programas de gestão de demanda, pode-se encontrar o *congestion charging* (também conhecido como pedágio urbano), descrito em maiores detalhes na seção 2.2.

2.2 *Congestion Charging e Congestion Pricing*

Nesta seção são apresentadas as diversas facetas dos sistemas de *congestion charging*, tais como a base teórica que justifica a sua utilização, as diferentes formas de operá-los e as principais dificuldades encontradas.

2.2.1 Apresentação conceitual

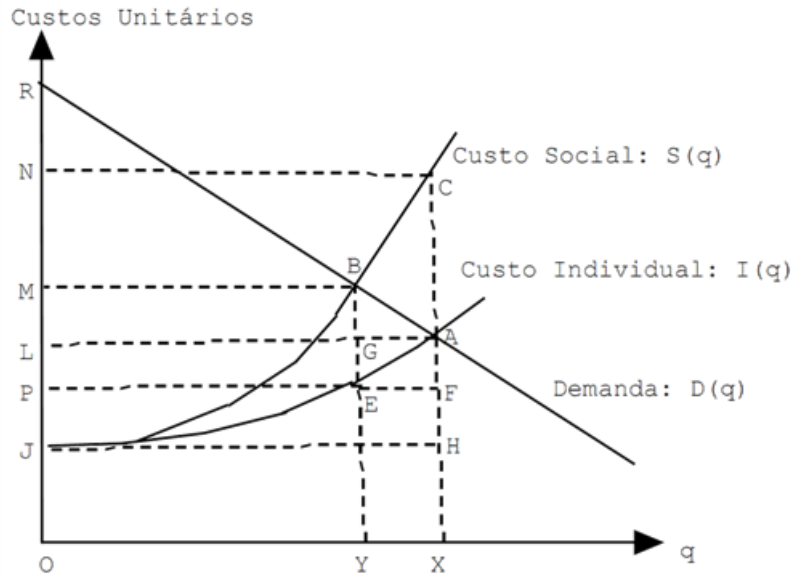
Dentre as várias políticas e iniciativas para redução de congestionamento, uma das possibilidades é o c*ongestion charging*, denominado regularmente “pedágio urbano” em português.

O termo “Pedágio Urbano” é pouco preciso, pois traz consigo conceitos enraizados de sistemas rodoviários e que não são necessariamente aplicáveis ao *congestion charging*. Este autor prefere os termos “precificação do congestionamento” e “tarifação do congestionamento” para se referir ao *congestion charging* na língua portuguesa.

Para ilustrar o conceito atrelado a sistemas de *congestion charging*, apresenta-se a Figura 2.2. Nela constam três curvas: a demanda e os custos individual e social do uso do automóvel. O eixo X representa o uso do espaço viário em veículos*km e o eixo Y representa os custos unitários em $/(veículos*km).

Note que quando o motorista encontra-se sozinho (q=0), o custo é igual a J – o custo de operação somado o custo do tempo em velocidade máxima. Quando mais veículos entram no sistema (ou seja, q aumenta), a sua velocidade reduz e o tempo requerido aumenta, aumentando I(q) (Prud’homme e Bocarejo, 2005).

Figura 2.2 - Gráfico dos custos e da demanda pelo uso do automóvel



Fonte: (Prud'homme e Bocarejo, 2005) (tradução nossa).

Um equilíbrio será atingido em A, onde I(q) e D(q) intersectam com X veículos*km sendo produzidos no sistema a um custo unitário igual a L. A partir desse ponto, o custo da viagem de automóvel seria maior do que o beneficio trazido pela sua realização (Prud'homme e Bocarejo, 2005).

No entanto, este é um equilíbrio sub-ótimo. Dado que as pessoas tomam decisões baseadas nos custos e benefícios individuais, não são consideradas diversas externalidades, como, por exemplo, o aumento de tempo de viagem das outras pessoas. Então, o custo social deste ponto é mais alto do que o custo individual. Encontra-se no gráfico no ponto C com um custo unitário de N.

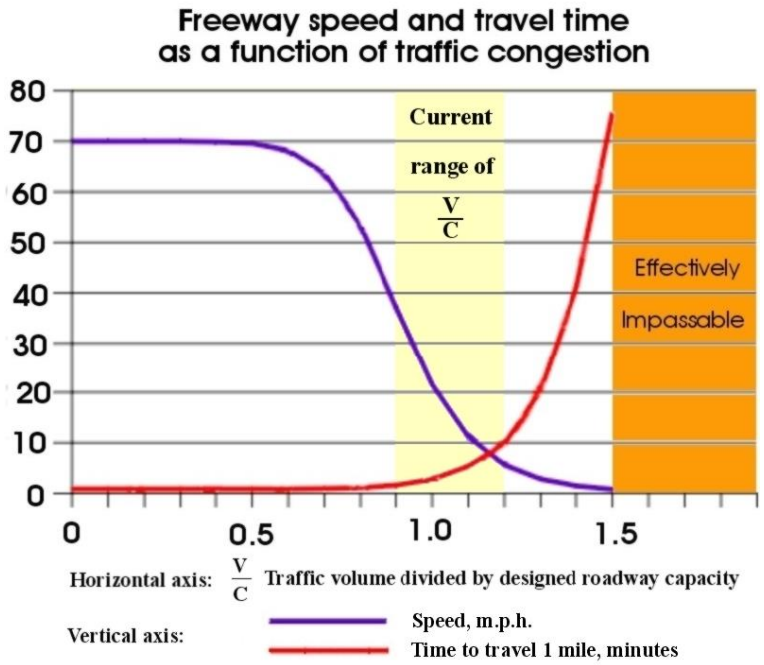
A real situação de equilíbrio ótimo seria o ponto B, onde a demanda D(q) intersecta com o custo social S(q) com Y veículos*km e custo unitário M (Prud'homme e Bocarejo, 2005).

Sugere-se então que essa situação possa ser atingida impondo aos agentes do sistema uma tarifa igual a EB (Prud'homme e Bocarejo, 2005).

Apresenta-se aqui outra forma de olhar para o mesmo problema. Em sistemas de *congestion charging*, toma-se como base a valoração da externalidade do congestionamento gerada por um indivíduo e, em seguida, na cobrança deste valor

do mesmo indivíduo. Em outras palavras, o sistema busca internalizar (em termos monetários) as externalidades que o usuário gera ao realizar uma viagem. Na Figura 2.3 é apresentado um gráfico que representa o desempenho (em velocidade e tempo de travessia) de uma via em função da sua utilização (em índices de V/C).

Figura 2.3 Exemplo de curvas de resposta de uma via



Fonte: (Raveling, 2007).

Conforme pode-se ver na Figura 2.3, a velocidade do fluxo em uma via decresce quando a quantidade de veículos aumenta e se aproxima da capacidade da via, o que leva ao consequente aumento do tempo para se cruzar aquela via. Tomando este gráfico como exemplo, pode-se imaginar a seguinte situação: quando um único veículo entra em uma via (aumento ΔQ no volume), ele causa um aumento no tempo para se cruzar aquela via (Δt) para todos os outros veículos que estão na via. O princípio básico da precificação de congestionamento é: cobrar o veículo que entrou no sistema por este aumento marginal de tempo de viagem coletivo que a sua viagem causou, além de todas as outras externalidades causadas, como, por exemplo, poluição por emissões atmosféricas e poluição sonora. Este seria um sistema baseado em tarifas pigouvianas (Pigou, 1920).

Apesar de ser um conceito razoavelmente simples, a sua viabilização passa por diversas dificuldades técnicas e políticas.

Conforme explicitado acima, o ideal seria tarifar os usuários pela externalidade negativa do congestionamento que a sua viagem causa. No entanto, a valoração desta externalidade é extremamente difícil, por se tratar de um sistema dinâmico nas dimensões tempo-espaciais. Portanto, geralmente opta-se por encontrar a tarifa por meio de estudos de valoração do tempo e disposição a pagar por uma via livre. Desta forma, distancia-se da base pigouviana original do *congestion charging*.

Outra dificuldade é desenvolver um sistema cuja complexidade seja compreensível para os usuários e que tenha um preço que seja compatível com a realidade local e que efetivamente reduza o congestionamento.

Além de algumas dificuldades técnicas, há também uma grande barreira política associada a sistemas de precificação de congestionamento. A proposta de implantar um sistema desses sofre, quase que invariavelmente, uma grande oposição política em seus estágios iniciais, principalmente por ser uma medida que procura afetar mais significativamente a população que utiliza o automóvel, população esta que geralmente possui maior poder aquisitivo e, consequentemente, maior voz política e representatividade.

Ainda no tocante à oposição política, há também o fato de grande parte da população julgar injusto ter de pagar uma "tarifa de congestionamento" uma vez que, a seus olhos, a falta de oferta de transporte público coletivo ubíquo e a incompatibilidade entre a demanda e os sistemas de transportes existentes são culpa dos órgãos públicos por dimensionarem o sistema urbano de forma errônea (Jordão e Salvo, 2012).

Vale ressaltar que o presente trabalho não focará nas questões políticas de sistemas de *congestion charging* e nem na identificação de um "culpado" pelo congestionamento. O presente trabalho lidará principalmente com os aspectos e dificuldades técnicas destes sistemas e, quando necessário, suscitará as questões passiveis de serem respondidas pelos reais tomadores de decisão.

Os objetivos a serem atingidos pelo sistema de *congestion charging* devem ser claros e relevantes. Um exemplo de objetivo que por si só não é relevante é "fazer

com que mais pessoas escolham o transporte público coletivo". O real objetivo a buscar seria algo mais próximo a "fazer com que menos pessoas escolham o automóvel nos horários de pico de congestionamento" (Eliasson, 2010) (tradução nossa). No segundo objetivo ilustrado, além da opção de escolher o transporte público coletivo, os usuários ainda podem alterar os seus horários de viagem ou até mesmo desistir de realizar a viagem.

2.2.2 Diferenciação e precificação

Na precificação dos sistemas de *congestion charging* pode haver várias dimensões de diferenciação, o que representa a aplicação de tarifas maiores ou menores ou até a isenção das tarifas caso alguns requisitos sejam atendidos. Esta seção busca explorar e detalhar essas possibilidades.

Deve-se manter em mente que as dimensões de diferenciação a seguir não se referem exclusivamente a sistemas de *congestion charging* – referem-se a qualquer forma de cobrança relativa à utilização de espaço viário.

O motivo para essas diferenciações é que nem toda viagem, nem todo passageiro e nem todo veículo afetam o congestionamento de forma equivalente a todo horário e em qualquer ponto do espaço.

Por exemplo, é fácil notar que um caminhão ocupa mais espaço na via do que um carro popular. Por outro lado, o automóvel carrega menos passageiros do que um ônibus biarticulado, apesar do ônibus ocupar mais espaço. A questão levantada, então, é: não seria mais condizente ajustar a tarifa para cada caso específico?

Nas próximas sessões serão discutidas quatro dimensões de diferenciação: abrangência física, tipo de veículo, variação temporal e distância percorrida (Palma e Lindsey, 2011).

2.2.2.1 Abrangência física

Existem três diferentes abrangências básicas dos sistemas de tarifas. São elas: vias específicas, cordões e sistemas de zonas.

2.2.2.1.1 Vias específicas

A cobrança em vias específicas é, de forma geral, aquela mais conhecida pelos usuários. Os sistemas que os usuários geralmente conhecem, porém, raramente têm a finalidade principal de reduzir o congestionamento na via. Como o nome bem sugere, esta forma de diferenciação considera a aplicação de uma tarifa a uma ou mais vias pré-determinadas. Esta é a forma regularmente encontrada no sistema rodoviário brasileiro.

A razão por ser tão amplamente utilizada é por sua facilidade e simplicidade. Qualquer automóvel que entrar no sistema é obrigado a pagar uma tarifa. O pagamento das tarifas se dá, normalmente, em cabines nas entradas, nas saídas ou ao longo do sistema.

Inovações tecnológicas recentes têm reduzido a interferência do processo de pagamento no fluxo da via. Trata-se de sistemas eletrônicos que dispensam a necessidade da troca de dinheiro em espécie durante a travessia da via.

Entram também nesta categoria as faixas de tráfego tarifadas. Este sistema pode ser encontrado em algumas rodovias americanas, onde se têm faixas expressas que podem ser utilizadas mediante o pagamento de uma tarifa, as *tolled express lanes*.

Existem também as *HOT lanes* (*High Occupancy Toll lanes*) das rodovias americanas. Nestes sistemas existem faixas específicas para veículos com altos índices de ocupação. No entanto, veículos com baixos índices de ocupação podem utilizá-las mediante o pagamento de uma tarifa.

Existe muito debate acerca das *HOT lanes* – popularizadas como "*Lexus lanes*" nos EUA – especialmente por estudos indicarem que usuários com renda acima da média são aqueles que utilizam as faixas com maior frequência (Rehm, 2013).

2.2.2.1.2 Cordões

Os sistemas com abrangência do tipo cordão são também relativamente simples. De forma resumida, é selecionada uma linha de contorno, denominada cordão. Cada passagem pelo cordão incorre, então, na cobrança de uma tarifa.

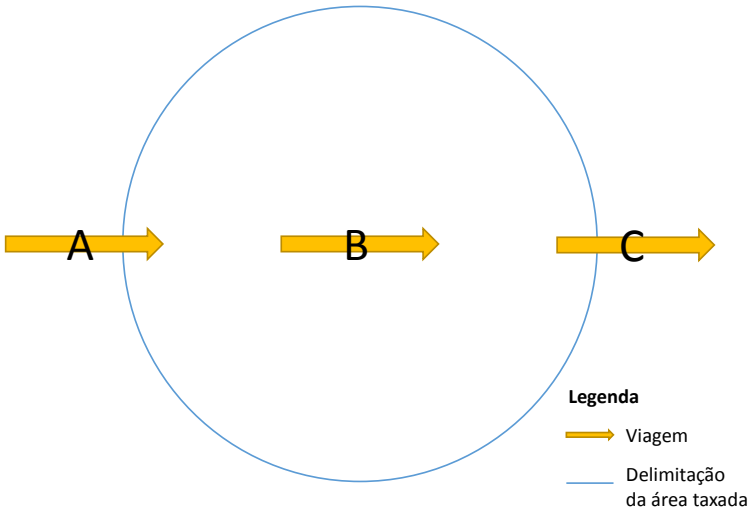
Quando se utilizam sistemas de cordões, existe um número limitado de pontos de controle. Isso, de forma similar à tarifação por vias específicas, facilita a instalação, operação e manutenção do sistema.

Vale mencionar que o sistema implantado em Estocolmo, na Suécia, funciona com um cordão com tarifação das 18 pontes que fazem ligação com a região central. Mais sobre este sistema será discutido no item 3.1.

2.2.2.1.3 Zonas

Já o sistema de zonas, apesar de ser semelhante ao de cordões, possui uma grande diferença conceitual: o indivíduo não é somente cobrado por atravessar a fronteira da região tarifa (como nos sistemas de cordões), mas cobra-se também por trafegar em qualquer ponto dela. A ilustração da Figura 2.4 serve como exemplo para distinguir os dois sistemas.

Figura 2.4 Exemplo para diferenças entre sistemas de Zonas e de Cordões



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em sistemas de cordões, somente as viagens A e C seriam tarifadas, pois cruzaram a fronteira da área tarifada. No entanto, em sistemas de zonas, a viagem B também seria tarifada.

Um sistema que utiliza a tarifação por zonas é o *London Congestion Charge*, discutido em mais detalhe na seção 3.2.

2.2.2.2 Tipo de Veículo

Como já foi mencionado no início do presente capítulo, veículos diferentes causam congestionamentos diferentes. Existe, portanto, a possibilidade de tarifação diferenciada também. Vale notar que certos veículos são essenciais para o funcionamento da região e podem ser isentados das tarifas.

Além dos exemplos mais óbvios, como tarifas mais altas para caminhões (grande tamanho e baixa ocupação), pode-se diferenciar (ou isentar) outros veículos, tais como:

- Carros ambientalmente "amigáveis" (ex: baixa emissão de CO_2);
- Taxis;
- Motocicletas;
- Bicicletas;
- Ônibus;
- Ambulâncias.

Não se deve esquecer também da alternativa de não diferenciação: todos os veículos sendo tarifados de forma igual, independente de seu tamanho, forma, serviço prestado ou índice de ocupação.

2.2.2.3 Variação Temporal

O custo da externalidade do congestionamento também varia com o tempo. Por exemplo: na cidade de São Paulo, as vias estão muito menos congestionadas entre 3h e 4h da manhã do que entre 8h e 9h da manhã (aproximadamente o pico da manhã). Isso faz com que a externalidade negativa coletiva decorrente da utilização de uma dessas vias seja potencialmente muito menor fora do horário de pico.

Portanto, pode-se considerar a diferenciação temporal das tarifas. As três formas mais comuns de realizar esta diferenciação são: tarifa simples/única (*flat rate*), tarifas por faixas horárias (*time-of-day*) e tarifas dinâmicas (*responsive tolls*).

2.2.2.3.1 Tarifa simples/única (*Flat rate*)

Este é o conceito mais simples na diferenciação temporal e representa, em verdade, a não diferenciação. O princípio é cobrar um único valor durante o período tarifado, como é o caso de Londres.

2.2.2.3.2 Tarifas por faixas horárias (*Time of day*)

Já a diferenciação por faixas horárias prevê a criação de determinadas faixas de horário com tarifas estipuladas de antemão.

A Tabela 2.1 e a Figura 2.5 mostram a relação de preços e faixas horárias do sistema implantado em Estocolmo, na Suécia.

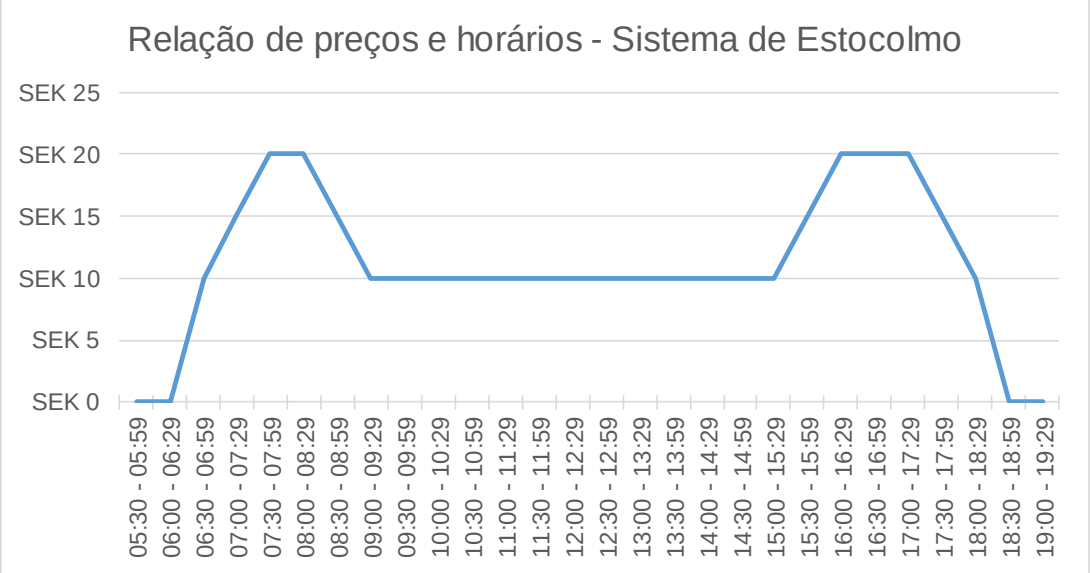
A vantagem deste tipo de sistema é que ele não só estimula a redução do tráfego na região tarifada, mas também estimula a mudança do horário de viagem, por meio de preços mais altos durante o horário de pico.

Tabela 2.1 Relação de preços e faixas horárias do sistema de *congestion charging* de Estocolmo

Hora do dia	Preço
00h00 às 06h29	SEK 0
06h30 às 06h59	SEK 10
07h00 às 07h29	SEK 15
07h30 às 08h30	SEK 20
08h30 às 08h59	SEK 15
09h00 às 15h29	SEK 10
15h30 às 15h59	SEK 15
16h00 às 17h29	SEK 20
17h30 às 17h59	SEK 15
18h00 às 18h29	SEK 10
18h30 às 23h59	SEK 0

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (Vägverket - Swedish Road Administration, 2006).

Figura 2.5 Relação de preços e faixas horárias do sistema de *congestion charging* de Estocolmo



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (Vägverket - Swedish Road Administration, 2006).

2.2.2.3.3 Tarifas dinâmicas (*Responsive tolls*)

A última forma de diferenciação temporal aqui apresentada, as tarifas dinâmicas, são certamente as mais complexas. Com esta diferenciação, busca-se medir os níveis de congestionamento e ajustar o valor da tarifa, com o fim de reduzi-lo da melhor forma possível.

Esta forma de diferenciação, apesar de à primeira vista ser muito interessante, pode ser de aplicação extremamente difícil, não somente pela dificuldade em medir o trânsito de forma dinâmica (dificuldade razoavelmente bem superada hoje por meio de câmeras e sensores), mas também por haver certa dificuldade em informar o valor da tarifa para o potencial passageiro/motorista a tempo de influenciar sua decisão.

Havendo, então, uma dificuldade de comunicação entre o sistema de tarifação e o usuário, a influência deste sistema na sua decisão de utilizar ou não o trecho sujeito à tarifa é comprometida. Mais detalhes sobre estas dificuldades são discutidos na seção 2.2.3.2.

Justamente pela dificuldade em informar o usuário a tempo de ele considerar um preço recém-calculado da tarifa (uma tarifa em tempo real) no momento de tomar as

decisões relativas à sua viagem (modo de transporte, caminho, etc.), a prática comum é de ajustar o valor da tarifa em intervalos mensais, trimestrais ou até mesmo semestrais, com bases em históricos de congestionamentos registrados.

2.2.2.4 Distância percorrida

Pode-se realizar, também, a diferenciação pela distância percorrida pelo veículo. Estes sistemas geralmente usam *transponders* ou equipamentos de rastreamento e monitoração via GPS para a determinação da distância percorrida na via/região tarifada.

Há também a possibilidade de realizar a não diferenciação por distância percorrida.

2.2.3 Dificuldades

A presente seção tem o propósito de trazer à tona algumas dificuldades referentes à implantação de sistemas de *congestion charging*.

2.2.3.1 Dificuldades políticas

Como explicitado na seção 2.2.1, existe uma dificuldade política muito grande relativa à implantação de sistemas de *congestion charging*, uma vez que ele representa a imposição de um desembolso ao usuário na hora de realizar sua viagem.

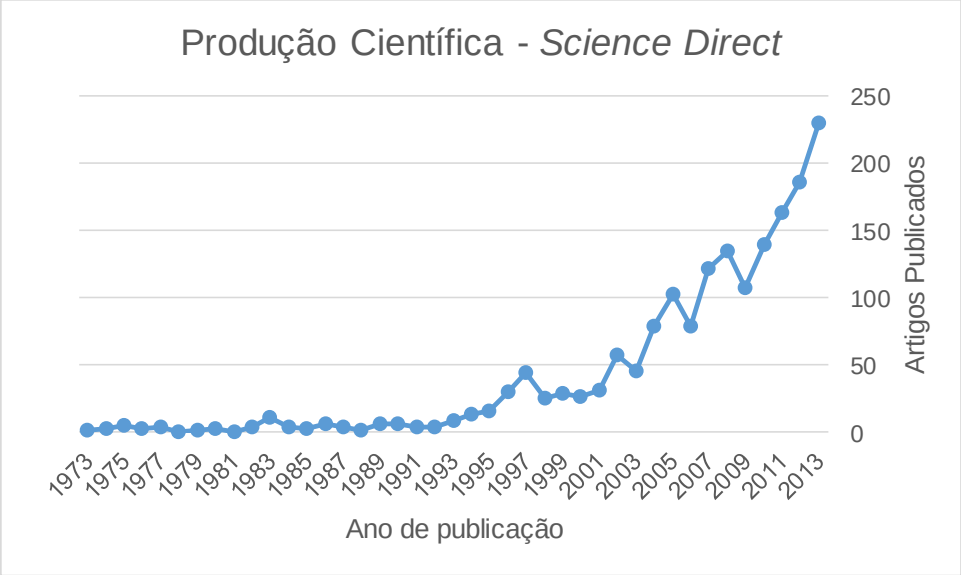
No entanto, existe grande esperança neste tipo de medida para aliviar o congestionamento urbano, pois apesar de outrora ter sido considerada como "suicídio político" (Frighetto, 2010; Hurst, 2013), os sistemas de *congestion charging* têm sido intensamente estudados (ver Figura 2.6), sendo Cingapura, Londres e Estocolmo três desses casos.

Um exemplo de sucesso político é o caso de Londres, onde o prefeito Ken Livingstone foi reeleito mesmo com propostas de extensão da área de cobrança e aumento da tarifa.

Também se pode mencionar aqui o caso de Estocolmo, onde o apoio público aumentou consideravelmente após a implantação do sistema de tarifas (Winslott-

Hiselius *et al.*, 2009). Outro estudo (Eliasson, 2010) aponta ainda uma curva representando o apoio popular antes e depois da implantação do sistema de *congestion charging*. A aceitabilidade inicial cai quando se aproxima do instante de implantação, porém após exposição às vantagens do sistema, a aceitabilidade cresce e supera os valores iniciais Figura 2.7.

Figura 2.6 Produção científica encontrada com os termos "*congestion charging*" e "*congestion pricing*" na base digital da *Science Direct*



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do portal *Science Direct*.

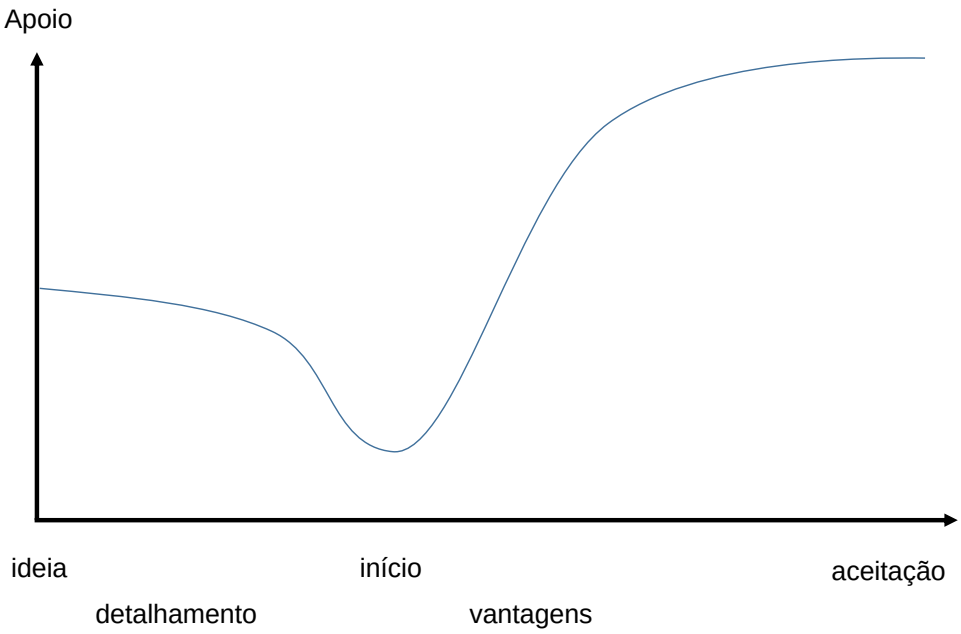
Uma das formas de aumentar o apoio popular e político desta medida é mostrar que receita do sistema de tarifas será utilizada para investir em:

- Melhorias infraestruturais (ex: ampliação de vias); e
- Melhorias no sistema de transporte público (ex: novas linhas de ônibus, metrô, corredores de ônibus).

Além da questão da imposição de mais um tributo aos cidadãos, uma pergunta que geralmente é levantada é relativa à equidade e à justiça dessa tarifa. Seguem as perguntas mais comuns: “A implantação de um sistema destes institucionalizaria a possibilidade de compra de espaço público?” e “É justo que o usuário do automóvel pague uma tarifa que financia principalmente melhorias no sistema de transportes coletivos, sendo que o próprio pagante da tarifa não receberá nenhum benefício

concreto, como expansão do sistema viário?". Deve ficar claro que o presente trabalho não busca responder a essas perguntas. No entanto, os propositores de medidas como o *congestion charging* devem estar preparados para respondê-las.

Figura 2.7 Aceitabilidade e apoio a sistemas de *congestion charging*



Fonte: (Eliasson, 2010) (tradução nossa)

2.2.3.2 Dificuldades quanto à transparência

Já foi mencionado no item 2.2.1 a dificuldade de manter os potenciais motoristas informados sobre o sistema e as tarifas vigentes quando há muita complexidade envolvida.

A transferência de informação ao usuário é extremamente importante, pois o sistema de tarifas é geralmente concebido supondo usuários bem informados. Caso a informação não seja transmitida de forma clara e compreensível ao usuário, sua resposta à informação disponível (ou à falta dela) pode ir absolutamente contra o esperado e até mesmo piorar a situação do congestionamento. Não se deve perder de vista também que o *congestion charging* é uma forma de sinalizar ao indivíduo sobre a externalidade negativa que sua viagem causa. O funcionamento do sistema pode ser comprometido caso esse sinal não seja compreendido.

Deve se ater também à complexidade do sistema, não só à transparência dele. Sistemas extremamente complexos, como o adjetivo sugere, são mais difíceis para o público compreender.

Portanto, apesar de ser aparentemente ideal que um sistema tenha diferenciação por distância rodada com atualização de preços em tempo real e tarifas diferentes para veículos diferentes em diversas zonas, tal sistema corre o risco de ser muito caro e também difícil demais para um potencial usuário compreender e tomar decisões racionais bem informadas.

A complexidade do sistema deve ser tal que o usuário se sinta confortável e consiga compreender onde ele possa trafegar, a que horas e quanto custaria para usar determinadas vias, entre outras questões pertinentes para a sua tomada de decisões referentes à sua potencial viagem.

Outro ponto que não pode deixar de ser levantado, especialmente quando se trata de um estudo para aplicar um sistema destes em São Paulo, é a transparência financeira. Os desvios de dinheiro por conta da corrupção são uma triste realidade da administração pública brasileira, realidade esta que conta com a participação de elementos da esfera privada (Seabra, Sofia e Amora, 2013). Portanto, para garantir a credibilidade de um sistema de *congestion charging* em São Paulo, deve-se estudar uma forma de garantir a transparência total deste sistema para os cidadãos para que não se caia no descrédito da mesma forma com que ocorreu com a CPMF (Aquino, 2011). As informações a serem disponibilizadas deverão ser não só de ordem financeira (receitas e custos, por exemplo), mas também de todos os aspectos do sistema (principais movimentos do sistema, pontos mais congestionados, relatórios de medição de congestionamento, entre outros). Também se deve levar em consideração a opinião da população no momento de reinvestir o dinheiro arrecadado em elementos do sistema de transporte coletivo.

2.2.3.3 Dificuldades legais

Invariavelmente surgirá o questionamento acerca de aspectos legais de um sistema de *congestion charging*. As duas principais questões a serem levantadas muito provavelmente serão:

- Um sistema de *congestion charging* pode ameaçar o direito básico de ir e vir garantido pela Constituição de 1988? O trecho relevante é explicitado a seguir:

> é livre a locomoção no território nacional em tempo de paz, podendo qualquer pessoa, nos termos da lei, nele entrar, permanecer ou dele sair com seus bens. (Brasil, 1988) Cap. I, Art. 5, Inc. XV.

- Em que categoria se encaixa o valor cobrado? Trata-se de imposto, taxa, tarifa, contribuição ou empréstimo compulsório?

Vale indicar que em Estocolmo, durante o processo de licitação do sistema de *congestion charging*, o valor cobrado ao usuário passou de uma "tarifa ambiental municipal" para um imposto estadual, dada uma investigação legal que defendeu ser ilegal que a cidade cobrasse veículos em movimento em vias já existentes (Eliasson, 2010).

2.2.4 Questões gerais a serem tratadas

Um estudo (Rivasplata, 2013) aponta que antes da implantação de um sistema de *congestion charging*, é necessário lidar com algumas questões, tais como:

- Definição da área a ser sujeita à cobrança
- Definição de grupos que receberão descontos ou isenções;
- Falta de dados confiáveis relativos ao registro de automóveis;
- Definição do tipo de sistema que será adotado (cordão, zonas, etc.);
- Elaboração de uma estratégia de captação de recursos e estabelecimento de um programa que mantenha a operação contínua do sistema;
- Elaboração de estimativa de custos e receitas com base em cenários de precificação
- Elaboração de estratégia para cobrir custos administrativos e para aplicação de recursos captados.

O mesmo estudo ainda suscita outros pontos a serem observados:

- Nem todas as cidades do mundo se beneficiariam de um sistema de *congestion charging;*

- Existem muitos países que são pobres demais para justificar a implantação de um sistema de *congestion charging*, uma vez que os custos iniciais e de manutenção são elevados;
- Pode ser que não haja um comprometimento por parte das autoridades para garantir o *enforcement* desse tipo de medida;
- Quando o *congestion charging* se mostrar ser uma alternativa viável, uma das maiores dificuldades será a garantia de apoio político sólido a longo prazo.

2.2.5 *Congestion charging* como parte de um plano maior

Quando se trata da redução de congestionamentos nos sistemas de transportes urbanos, não há nenhuma solução perfeita que, por si só, dê conta de todo o problema (European Conference of Ministers of Transport, 2007). Os sistemas de *congestion charging* não fogem a essa regra: eles só terão o seu funcionamento garantido se fizerem parte de um conjunto maior de políticas públicas de médio e longo prazo.

Esta afirmação é verdade não só por conta da eficiência da redução do congestionamento, mas também por conta da aceitabilidade pública de um sistema destes. Caso os cidadãos não percebam a robustez e a seriedade do sistema de *congestion charging* e como ele se encaixa em um programa maior, o sistema será visto como apenas uma medida tomada “na base da canetada”, percepção esta ocorrida com o sistema de Rodízio Municipal em São Paulo (Feldman, 2012).

No caso de São Paulo, seria necessário considerar não só um sistema de *congestion charging*, mas também reavaliar todo o sistema de transportes públicos coletivos. Por exemplo, as linhas de ônibus devem ser gradualmente redesenhadas para melhor servir a população, apesar dos problemas que isso já causou em situações anteriores, mesmo com alterações razoavelmente pequenas (Vale, 2013).

Outro elemento que deve ser considerado é o conflito entre os interesses políticos e econômicos dos tomadores de decisões. Um exemplo disso é a política municipal e estadual recente a favor de investimentos nos transportes coletivos ao mesmo tempo em que o governo federal oferece redução de impostos para estimular a compra de automóveis (Ribeiro, 2013). Estes conflitos reduzem a credibilidade

(Ucho Info, 2013) e diminuem a eficiência das políticas públicas de melhoria nos sistemas de transportes coletivos.

Um estudo (Goodwin, 1989) sugere que tanto a receita quanto o espaço viário livre gerados por sistemas de congestion charging sejam divididos em três partes iguais. Sugere-se que o espaço viário livre gerado seja utilizado para: melhorias ambientais (o que incluiria áreas de pedestres e de não-transporte); acomodação do tráfego adicional atraído pelo ganho de velocidade; e o aumento de velocidade do sistema viário. Sugere-se também que a receita seja dividida igualmente em: melhorias ao sistema de transporte público; investimentos em infraestrutura; e arrecadação ao poder público para a redução da arrecadação de outras tarifas, impostos e taxas.

2.3 O congestionamento em São Paulo

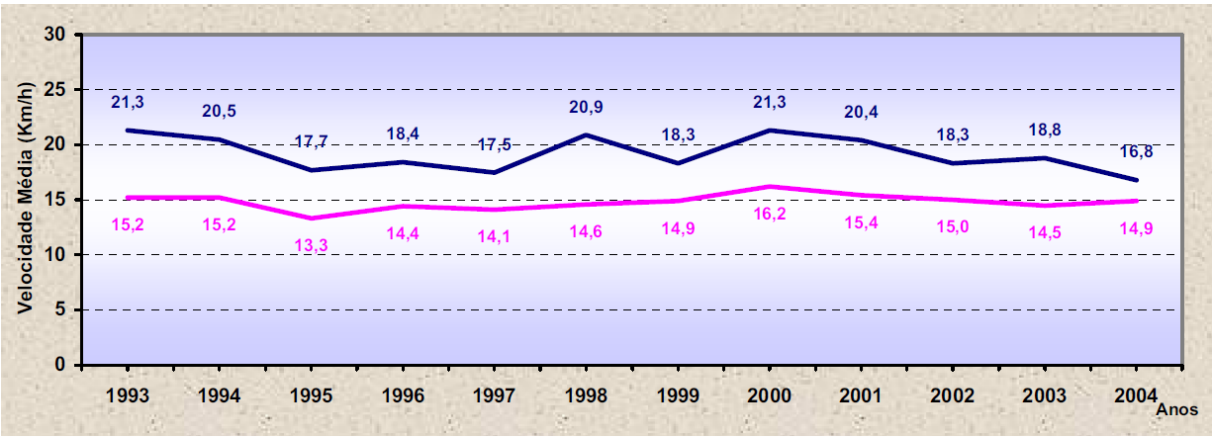
A Companhia de Engenharia de Tráfego produz relatórios anuais sobre as velocidades observadas no tráfego geral da cidade.

No entanto, ao estudar estes relatórios, foram encontradas grandes dificuldades em obter uma série consistente de dados, uma vez que a forma de apresentar as informações passou por diversas alterações. Em alguns anos, são dispostas as informações categorizadas por tipo de tráfego (tráfego geral e ônibus), por horário (manhã e tarde) e por sentido (bairro-centro ou centro-bairro). No entanto, em outros anos, as informações são fornecidas de forma agregada.

Além disso, existe informação conflitante entre os relatórios. Um exemplo disso é a diferença apresentada nos históricos de velocidades ilustrados na Figura 2.8 e na Figura 2.9.

A falta de informação georreferenciada sobre o congestionamento também traz grandes dificuldades ao se tentar analisar o caso de São Paulo.

Figura 2.8 Histórico de velocidades de São Paulo - 1993 a 2004 - Tarde - Sentido Centro-Bairro

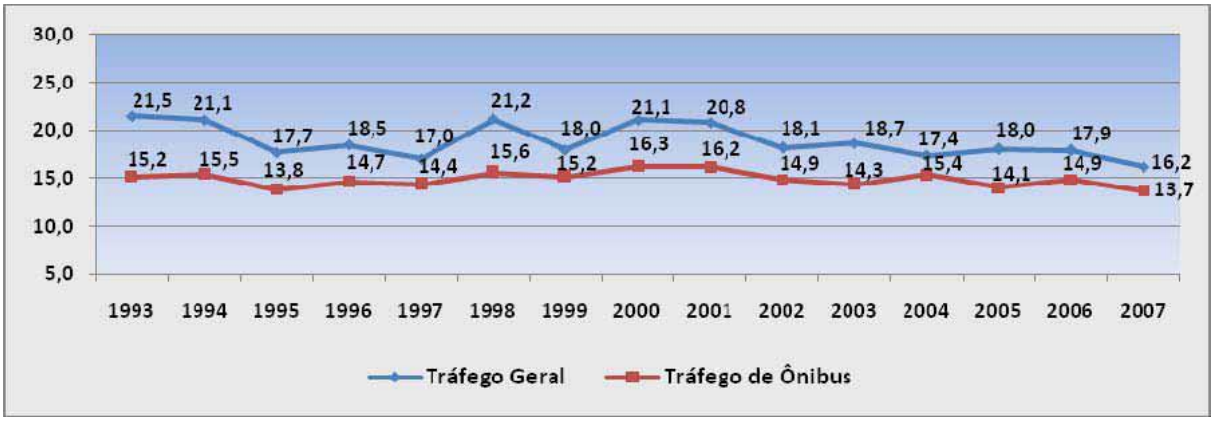


Velocidade Média dos Ônibus

Velocidade Média do Tráfego Geral (média referente às rotas que apresentam resultados para o tráfego geral e ônibus para todos os anos da série histórica).

Fonte: (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2005)

Figura 2.9 Histórico de velocidades de São Paulo - 1993 a 2007 - Tarde - Sentido Centro-Bairro



Velocidade Média dos Ônibus

Velocidade Média do Tráfego Geral (média referente às rotas que apresentam resultados para o tráfego geral e ônibus para todos os anos da série histórica).

Fonte: (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2008)

2.4 Políticas para redução de congestionamento em São Paulo

Em São Paulo, ao longo do tempo, os principais mecanismos para aliviar o congestionamento urbano basearam-se classicamente na implantação de novas vias ou alterações que aumentassem a capacidade das vias já existentes, incorrendo então no ciclo vicioso mencionado na seção 2.1.3.

Nas últimas décadas, no entanto, foram implantadas algumas medidas que merecem destaque, detalhadas nas seções a seguir.

2.4.1 Rodízio

Em 1997 (Prefeitura do Município de São Paulo, 1997), implantou-se um dos primeiros reais sistemas de gestão de demanda na cidade de São Paulo: o Programa de Restrição ao Trânsito de Veículos Automotores no Município de São Paulo, também conhecido como “Rodízio de veículos”, “Rodízio de automóveis” e “Rodízio municipal”. Este programa buscou a redução do congestionamento na cidade por meio da restrição de circulação na região do centro expandido, realçado na Figura 2.10. A restrição é baseada em uma relação entre os dias da semana e os finais das placas dos carros, conforme ilustrado na Tabela 2.2. As restrições estão ativas nos seguintes horários: das 7h às 10h e das 17h às 20h (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2010).

Apesar da dificuldade em relação à consistência dos dados da CET, pode-se ver claramente na Figura 2.8 e na Figura 2.9 a influência que a medida do rodízio teve na velocidade dos automóveis quando se estuda as velocidades dos anos de 1997 e 1998. Para o tráfego geral nota-se um aumento de velocidade de aproximadamente 22%, enquanto que os ônibus tiveram cerca de 6% de aumento.

Apesar dos resultados positivos do rodízio (elevação da velocidade do sistema de transportes da metrópole em pouco tempo), em outras cidades com políticas semelhantes como a Cidade do México, a falta de uma política eficiente de médio e longo prazo levou o sistema à lenta degradação: grande parte da população, para conseguir circular nos dias de rodízio, comprou um segundo carro, geralmente mais antigo, mais barato e mais poluente (Mahendra, 2008), fazendo com que a cidade voltasse a velocidades menores.

Figura 2.10 Área de restrição do Rodízio de automóveis em São Paulo

Fonte: (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2010)

Tabela 2.2 Relação entre dias da semana e placas proibidas de circular no centro expandido

Dia da semana	Final da placa
Segunda	1 e 2
Terça	3 e 4
Quarta	5 e 6
Quinta	7 e 8
Sexta	9 e 0

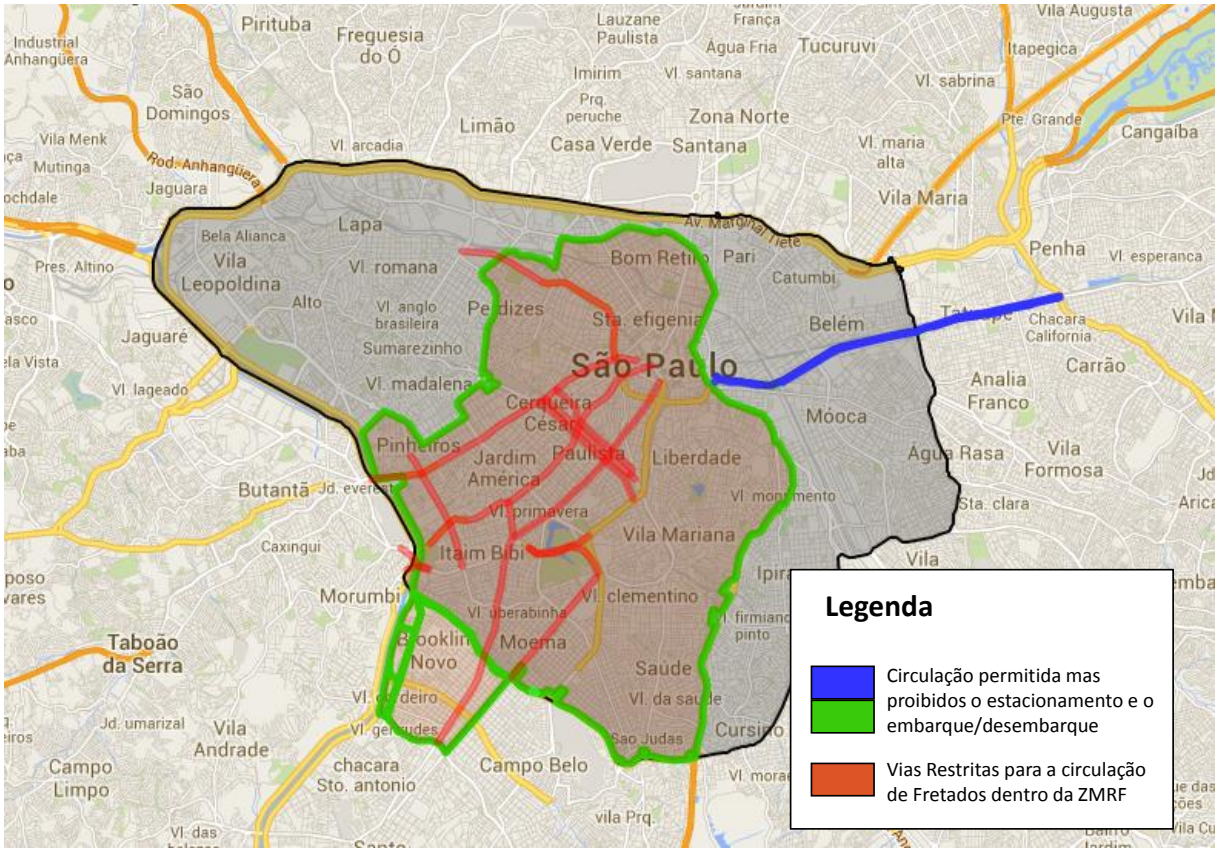
Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2010)

2.4.2 Restrição para os ônibus fretados

Em 2009, a Prefeitura do Município de São Paulo implantou a Zona Máxima de Restrição de Fretamento (ZMRF), programa que procura reduzir os impactos no trânsito da cidade por meio da imposição de restrições à circulação de veículos do sistema de fretamento (Prefeitura do Município de São Paulo, 2009; Secretaria Municipal de Transportes - São Paulo, 2013).

Na Figura 2.11 estão ilustradas a ZMRF e as vias com restrições.

Figura 2.11 Zona de Máxima Restrição de Fretamento



Fonte: (Prefeitura do Município de São Paulo, 2013)

2.4.3 Restrição de caminhões

A partir do dia 5 de março de 2012 foi imposta uma restrição à circulação de caminhões na Marginal Tietê, bem como em outras vias do município (G1 Notícias - São Paulo, 2012), conforme ilustrado na Figura 2.12.

Existem exceções às restrições para caminhões de urgência, socorro mecânico de emergência, cobertura jornalística, obras e prestação de serviços de emergência, Correios, veículos que fazem acesso a estacionamento próprio (mediante porte de autorização especial) e que prestam serviço emergencial de sinalização de trânsito.

Além disso, no horário da restrição também é permitido o tráfego de caminhões de concretagem e concretagem-bomba, feiras livres (mediante porte de autorização especial), mudança (mediante porte de autorização especial), coleta de lixo, transporte de produtos alimentícios perecíveis (mediante porte de autorização especial), obras e serviços de infraestrutura urbana.

Figura 2.12 Vias atingidas pela restrição à circulação de caminhões

Fonte: (G1 Notícias - São Paulo, 2012)

Também são feitas algumas ressalvas em horários específicos:

Nos períodos entre 5h e 9h e entre 17h e 18h é permitido o tráfego de caminhões que fazem remoção de terra em obras civis, e no período entre 17h e 20h, veículos que fazem o transporte de valores.

No horário das 5h às 9h são permitidos os caminhões que fazem o transporte de máquinas, equipamentos e materiais básicos para a construção civil.

2.5 *Congestion charging* no Brasil e em São Paulo

Nesta seção serão expostos documentos oficiais e discussões envolvendo o *congestion charging* e o cenário brasileiro e, por vezes, a cidade de São Paulo.

2.5.1 Política Nacional de Mobilidade Urbana

Em 3 de janeiro de 2012 entrou em vigor a Lei Federal Nº 12.587, que institui o Plano Nacional de Mobilidade Urbana.

Dentre outras inovações, a lei habilita os entes federativos a utilizarem:

> aplicação de tributos sobre modos e serviços de transporte urbano pela utilização da infraestrutura urbana, visando a desestimular o uso de determinados modos e serviços de mobilidade, vinculando-se a receita à aplicação exclusiva em infraestrutura urbana destinada ao transporte público coletivo e ao transporte não motorizado e no financiamento do subsídio público da tarifa de transporte público, na forma da lei. (Brasil, 2012), Cap. V, Art. 23, Inc. III.

A legislação federal, portanto, dá poderes aos órgãos responsáveis pela gestão dos sistemas de transportes urbanos para implantar sistemas de *congestion charging*.

Além disso, a legislação vai adiante e impõe vínculos entre a receita do sistema e melhorias aos sistemas de transporte coletivo e aos sistemas não motorizados, bem como o financiamento do subsídio já existente à tarifa do transporte público.

2.5.2 Plano Integrado de Transportes Urbanos 2025

O Plano Integrado de Transportes Urbanos 2025 (Secretaria dos Transportes Metropolitanos, 2006) trouxe, em uma de suas diversas análises, a simulação da RMSP em 2025 após a implantação de um sistema de pedágio urbano.

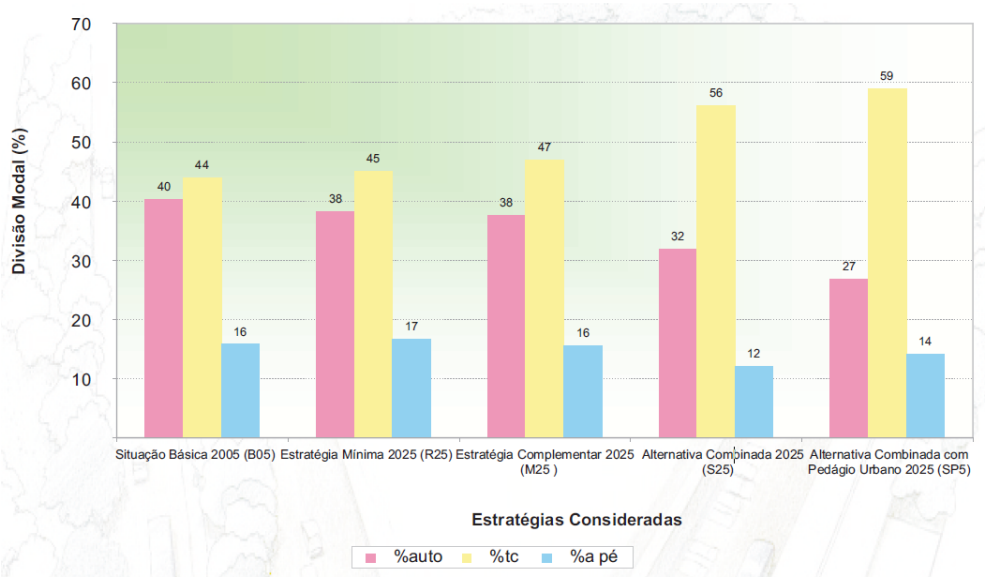
Nas simulações realizadas, optou-se por um sistema no qual os veículos que trafegavam no Centro Expandido ficassem sujeitos à cobrança de uma tarifa quilométrica (em função da distância percorrida). Esta opção de modelagem foi feita principalmente por conta das limitações do software utilizado (TRANUS). A tarifa adotada foi de R$ 0,47 / km, correspondente a cerca de 70% do custo operacional percebido pelos usuários (Secretaria dos Transportes Metropolitanos, 2006).

Nas simulações realizadas, notou-se que, apesar de ocorrer a inibição do transporte individual, o total de viagens alocadas não apresentou mudanças significativas, fazendo com que houvesse uma migração para o transporte coletivo e

deslocamentos a pé (Figura 2.13). Notou-se também uma queda da produção de veículos*km e consequente aumento de velocidade (Figura 2.14).

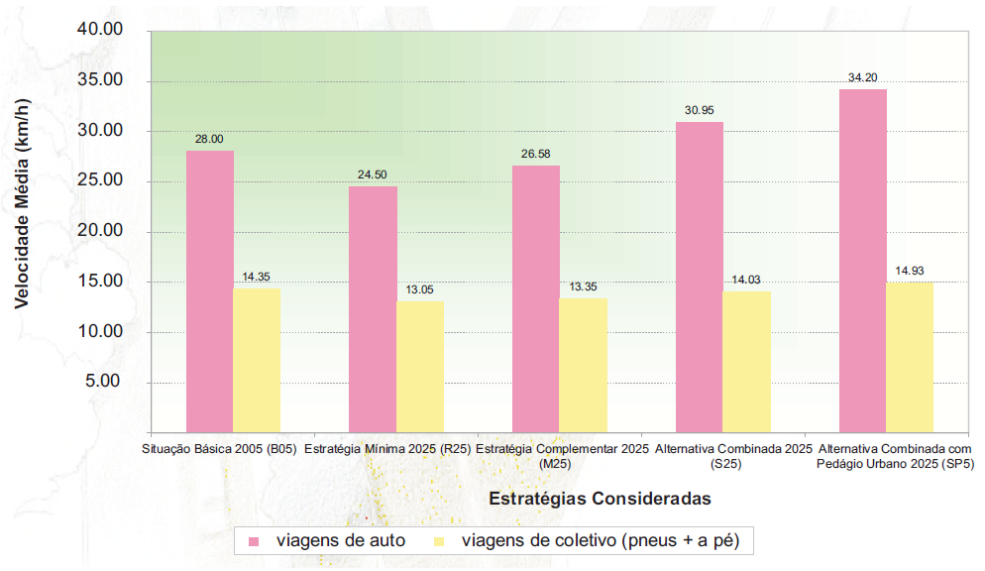
A partir destas simulações, estimou-se que haveria uma arrecadação de cerca de R$ 660 milhões por ano.

Figura 2.13 Divisão modal resultante nas simulações das Estratégias de Referência (B05, R25, M25) e Estratégia Combinada sem e com o pedágio urbano (S25 e SP5)



Fonte: (Secretaria dos Transportes Metropolitanos, 2006)

Figura 2.14 Velocidades médias inclusive com pedágio urbano



Fonte: (Secretaria dos Transportes Metropolitanos, 2006)

2.5.3 SP 2040 – A Cidade que Queremos

Apesar de não conter dados específicos de simulação de um sistema de *congestion charging*, o estudo SP 2040 – A Cidade que Queremos (Secretaria Municipal do Desenvolvimento Urbano, 2012) traz pontos relevantes à análise. São eles:

- Para garantir sucesso de políticas de uso do solo e transporte, é necessário tornar o automóvel um modo menos atrativo (mais caro ou mais lento), caso contrário, as pessoas continuarão fazendo viagens longas;
- Apesar das simulações geralmente apontarem para um sucesso dos sistemas de Pedágio Urbano, "não faz sentido tal instrumento, que tem inclusive efeito regressivo, quando não se dispõe de um eficiente serviço de transporte coletivo, capaz de acolher os usuários que serão deslocados do transporte individual pela instituição do pedágio". Portanto, só se deve implantar este tipo de sistema uma vez que as redes de alta e média capacidade atingirem extensão e qualidade apropriadas na área pedagiada;
- É considerada a implantação de um sistema de *congestion charging* no Centro Expandido, dada sua grande concentração de viagens. Estudos detalhados de congestionamento, no entanto, deverão guiar os reais limites da área a ser pedagiada;
- Além do *congestion charging*, devem ser estudadas também novas políticas públicas relativas aos estacionamentos, como restrições de estacionamento em vias públicas e novas estratégias de precificação nos estacionamentos privados;
- A implantação de um sistema de *congestion charging* deverá passar por consulta pública. Suas definições técnicas deverão ser baseadas em estudos de profundidade, que mostrem benefícios e reais impactos associados à sua implantação.

2.5.4 Revista Movimento

Em 2004, a revista Movimento da ANTP publicou um artigo sobre o Pedágio Urbano em São Paulo (Balassiano e Scaringella, 2004): Balassiano diz que sem fazer melhorias substanciais nos sistemas de transportes das cidades, pode-se inviabilizar o sucesso da implantação de um Pedágio Urbano. Na mesma publicação,

Scaringella aponta que simulações feitas por sua equipe mostravam que ao cobrar tarifas em 212 quilômetros de vias de trânsito saturado, obter-se-iam arrecadações anuais de cerca de R$700 milhões. Scaringella também defende que estes sistemas devam ter um papel importante na discussão dos novos modelos de gestão de mobilidade das cidades.

2.5.5 Boletins FDTE

Em 2013, a Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) lançou em seus boletins o debate sobre o assunto de Pedágio Urbano. Em Agosto (Campos Filho, 2013) e Outubro (Vasconcellos, 2013), Cândido Malta e Eduardo Vasconcellos fazem os seus comentários sobre o assunto. Vasconcellos é da opinião de que um sistema destes teria “pequeno efeito” na imensidão da cidade e sugere outras políticas ligadas a estacionamentos: proibição de estacionar nas vias e aumento dos preços em locais privados pagos. Já Cândido Malta é forte defensor do *congestion charging* e sugere que as manifestações que aconteceram em Julho de 2013 (Aragão *et al.*, 2013) foram indício da juventude clamando por um sistema destes.

2.5.6 Outros estudos

Em uma dissertação (Lucas Junior, 2008), é proposta uma metodologia para implantação de sistemas de Pedágio Urbano envolvendo cinco etapas, com diversas subatividades. Segue a metodologia proposta:

- Etapa 1 – Delimitação da área pedagiada;
    - Identificação da área central através dos planos urbanísticos
    - Análise de atração de viagens
- Etapa 2 – Definição dos postos de pedágio e escolha da tecnologia;
- Etapa 3 – Análise da viabilidade do projeto;
    - Estudo de viabilidade técnica
    - Estudo de viabilidade econômica
        - Tipo de cobrança a ser adotado
        - Valor da tarifa a ser aplicado
        - Estimativa do volume de tráfego na área tarifada

        - Isenções de tarifa
        - Avaliação financeira do projeto
    - Capacidade de obtenção de crédito
- Etapa 4 – Investimentos pré-pedágio urbano;
- Etapa 5 – Investimentos pós-pedágio urbano;

Com a aplicação desta metodologia à cidade do Rio de Janeiro, supondo um sistema de cordão envolvendo a área central da cidade, com variações de preço (de R$4,20 a R$8,40) em determinadas faixas horárias e supondo reduções do número de veículos da ordem de 10% a 20%, estimaram-se receitas entre R$300 milhões e R$337 milhões no primeiro ano de pedagiamento (Lucas Junior, 2008).

Levanta-se também a hipótese de atrelar os preços das tarifas do sistema de Pedágio Urbano aos preços dos sistemas de transportes públicos. Neste caso específico, utilizou-se como referência o valor da passagem do ônibus na cidade (R$2,10 no Rio de Janeiro em 2008).

No mesmo estudo, discute-se a adoção de políticas de incentivo a sistemas de *park and ride* por meio da construção de estacionamentos próximos às áreas pedagiadas com acesso a sistemas de transportes públicos. Sugere-se também desconto ou até isenção da passagem àqueles que utilizarem esses estacionamentos integrados.

2.6 Consolidação de conceitos e resumo

Nesta seção faz-se um curto resumo dos principais pontos levantados na revisão da literatura e são elencadas as principais questões a serem discutidas quanto à implantação de um sistema de *congestion charging* em São Paulo.

2.6.1 Principais benefícios

Os principais benefícios que um sistema de *congestion charging* pode trazer são:

- Melhor distribuição temporal da demanda por espaço viário e estímulo de mudança do horário de viagem para fora do horário de pico;
- Mudanças nas rotas utilizadas pelos motoristas;
- Redução de congestionamentos;

- Melhorias ambientais no que diz respeito à qualidade do ar;
- Estimular uso de veículos que sejam ambientalmente “amigáveis”;
- Geração de receita e possibilidade de reinvestimento no próprio sistema de transportes (preferencialmente no sistema de transporte público coletivo).

2.6.2 Principais dificuldades

As principais dificuldades para a implantação de um sistema de *congestion charging* podem ser:

- Resistência popular e política;
- Dificuldades quanto à transparência de informações e complexidade do sistema;
- Dificuldades quanto à transparência financeira do sistema;
- Dificuldades técnicas relativas à escolha das vias ou regiões sujeitas ao sistema de *congestion charging,* do tipo de sistema (via específica, cordão, etc.) e da tecnologia utilizada;

2.6.3 Medidas conjuntas

Conforme explicitado na seção 2.2.5, é necessário que o *congestion charging* venha conjuntamente com diversas outras medidas, tais como:

- Campanhas políticas para conscientização e esclarecimento quanto aos motivos, benefícios e importância do sistema, bem como as suas raízes teóricas e os casos de sucesso mundo afora;
- Redesenho gradual de todo o sistema metropolitano de transporte público coletivo para acomodar a demanda;
- Criação de sistemas de transporte público coletivo para a parcela da população que utiliza o automóvel por falta de opção;
- Estabelecimento de canal de discussão público através do qual a população possa avaliar os dados de operação e também dar sua opinião quanto ao destino do dinheiro arrecadado (a parcela que sobra após descontar as despesas operacionais do sistema);

- Políticas focadas nos combustíveis e nos estacionamento para desestimular o uso do automóvel;
- Políticas de redistribuição do uso do espaço urbano, tais como o estímulo à migração de empresas para regiões residenciais e adensamento de empregos e residências nas proximidades dos sistemas de transportes coletivos;
- Incentivos fiscais a empresas que contratam pessoas que morem próximas ao local de trabalho;
- Incentivos fiscais a escolas, faculdades e seus alunos para estimular a escolha de unidades de ensino próximas ao local de moradia;
- Estímulo para que empresas adotem políticas tais como o “teletrabalho” ou de mudanças nos horários de início e fim do expediente para reduzir a demanda nos horários de pico;

2.6.4 Perguntas frequentes

Os tomadores de decisão devem estar preparados para responder questões difíceis como aquelas ilustradas abaixo.

Os usuários do automóvel poderão questionar:

- “É justo que o usuário do automóvel pague uma 'tarifa de congestionamento', uma vez que a falta de oferta de transporte público coletivo ubíquo e a atual incompatibilidade entre a demanda e os sistemas de transportes existentes são culpa das gestões antigas dos órgãos públicos por dimensionarem o sistema urbano de forma errônea?”;
- “É justo que o usuário do automóvel pague uma tarifa que financia principalmente melhorias no sistema de transportes coletivos, sendo que o próprio pagante da tarifa não receberá nenhum benefício concreto como, por exemplo, melhorias no sistema viário visando ao aumento de velocidade dos automóveis?”
- "Se os usuários do automóvel não possuem a alternativa de realizar a viagem por transporte coletivo e nem de mudar seus horários de viagem (situação esta mais frequente no caso de famílias de baixa renda), faz sentido a

aplicação de um '*congestion charge'* para estimular a mudança do comportamento de viagem das pessoas?"

Os usuários do transporte público coletivo poderão indagar:

- "O sistema de transporte atual conseguiria lidar com o volume de passageiros deslocados do sistema de transporte individual?"

Os cidadãos de forma geral poderão perguntar:

- “A implantação de um sistema destes institucionalizaria a possibilidade de compra de espaço público?”
- “Como é que a população poderá ter certeza de que o dinheiro coletado pelo sistema de *congestion charging* não sofrerá desvios e será, de fato, reinvestido no sistema de transportes públicos coletivos?”;
- “Um sistema de *congestion charging* não fere o direito básico de ir e vir garantido pelo Art. 5, inciso XV da Constituição Brasileira de 1988?”;
- “Como é que o poder público irá decidir a destinação do dinheiro arrecadado?”

3 CASOS INTERNACIONAIS

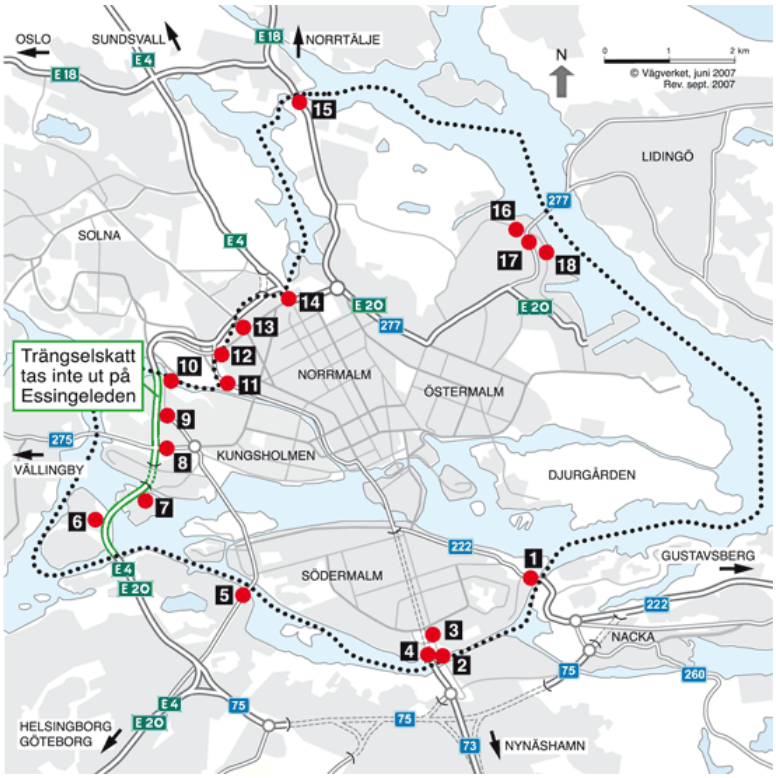
Nesta seção são apresentados os três casos mais relevantes na prática internacional de *congestion charging*: Estocolmo, Londres e Cingapura.

3.1 Estocolmo

O sistema de *congestion charging* foi introduzido em Estocolmo em Janeiro de 2006 e passou por um período de teste de seis meses, após o qual seria votada a manutenção do sistema ou não por meio de um referendo. Após aprovação no referendo, o sistema entrou em vigor novamente a partir de Agosto de 2007.

O sistema é do tipo cordão, abrangendo as 18 pontes que fazem o acesso à região central da cidade, como mostra a Figura 3.1. O controle é realizado por câmeras com *software* de reconhecimento automático de placas.

Figura 3.1 Fronteira (tipo cordão) do sistema de Estocolmo abrangendo as 18 pontes conectando as ilhas centrais



Fonte: (Swedish Transport Agency, 2007)

Os valores da tarifa possuem diferenciação de faixas horárias, como mostra a Tabela 3.1. O valor máximo pago por dia é limitado em SEK 60 (aproximadamente R$ 20,42[1]).

Tabela 3.1 Relação de preços e faixas horárias do sistema de *congestion charging* de Estocolmo

Hora do dia	Preço
00h00 às 06h29	SEK 0
06h30 às 06h59	SEK 10
07h00 às 07h29	SEK 15
07h30 às 08h30	SEK 20
08h30 às 08h59	SEK 15
09h00 às 15h29	SEK 10
15h30 às 15h59	SEK 15
16h00 às 17h29	SEK 20
17h30 às 17h59	SEK 15
18h00 às 18h29	SEK 10
18h30 às 23h59	SEK 0

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (Vägverket - Swedish Road Administration, 2006).

Há a isenção da tarifa para certos veículos, tais como: veículos de serviços emergenciais, motocicletas, veículos militares, entre outros. Houve também isenção de veículos que utilizavam combustíveis alternativos, motivo este que, em conjunto com outros fatores, influenciou fortemente o mercado automobilístico a favor desse tipo de automóvel (Börjesson *et al.*, 2012). No entanto, desde 1 de Janeiro de 2009 esta isenção vem sendo removida aos poucos.

A Figura 3.2 ilustra os resultados em relação ao número de travessias pelo cordão entre 6h e 19h desde 2005 (antes do sistema der iniciado) até 2011.

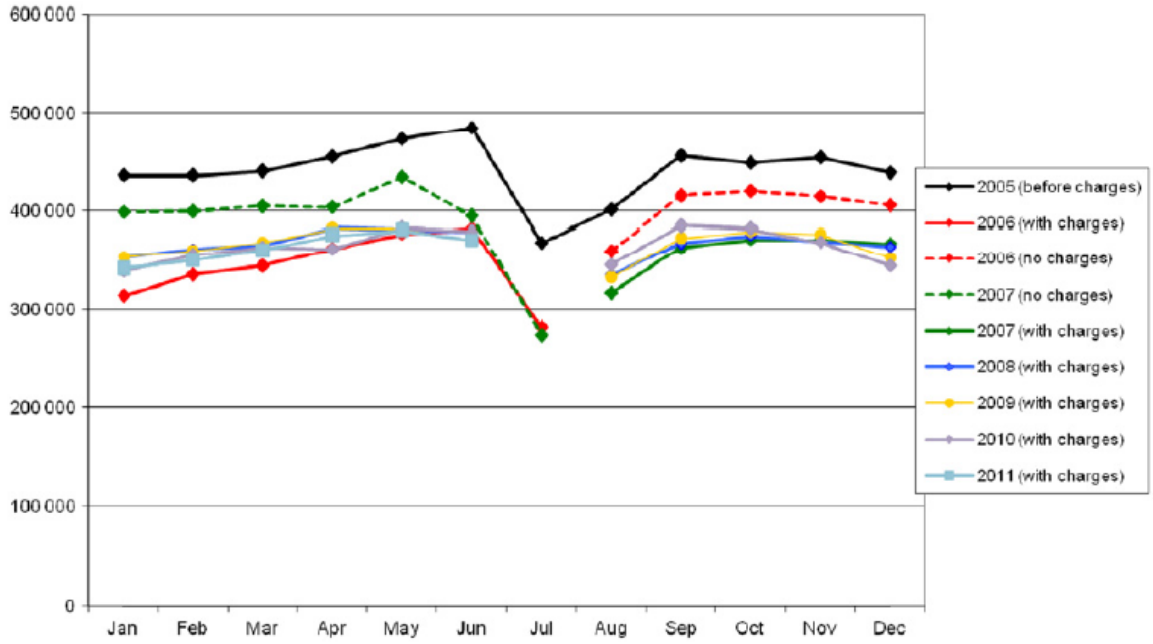
Nota-se que a partir de 2008 o sistema de tarifação não entra em operação durante o mês de Julho.

Pode-se ver uma considerável queda no número de travessias realizadas dos anos de 2006 em diante. Este comportamento pode ser visto até mesmo no período entre

[1] Conversão feita em 19/02/2015 no site da Google: https://www.google.com/search?q=60+sek+in+brl

Agosto de 2006 e Julho de 2007 – período em que o sistema estava em fase de avaliação após o teste inicial, o que pode indicar uma mudança no comportamento dos usuários.

Figura 3.2 Média de travessias pelo cordão em dias da semana entre 6h e 19h de 2005 a 2011



Fonte: (Börjesson et al., 2012)

Em 2004, o apoio popular da implantação de um sistema de *congestion charging* era muito baixo, sendo avaliado em apenas 40% com respostas de “provavelmente” e “muito provavelmente" quando cidadãos eram indagados se votariam “sim” para a manutenção do sistema em uma pesquisa de preferência declarada. Este apoio favorável caiu para 36% momentos antes do período de teste iniciar. No entanto, pouco tempo após o início da operação do teste, o apoio aumentou para 52% (Börjesson *et al.*, 2012).

Também são levantadas algumas razões para este aumento no apoio público (Börjesson *et al.*, 2012):

- Os benefícios da existência do sistema foram maiores do que o esperado;
- Os lados negativos da tarifa não foram tão ruins como inicialmente imaginado;

- Redução de resistência ao sistema devido à dissonância cognitiva (fenômeno também conhecido como “aceitar o inevitável”);
- A familiaridade com sistemas do tipo reduz a relutância contra os mesmos.

O apoio político foi alcançado principalmente por encaixar o sistema de *congestion charging* em um plano maior de planejamento de transportes, incluindo-o no programa de investimentos nacionais (Börjesson *et al.*, 2012).

Sugere-se que os custos de implantação do sistema (cerca de SEK 1.900 milhões, o equivalente a R$ 646 milhões[2]) em Estocolmo poderiam ser “recuperados” em 4 anos de funcionamento, considerando-se os benefícios sociais gerados. Os custos anuais de operação do sistema são da ordem de SEK 220 milhões (aproximadamente R$ 75 milhões[3]) (Eliasson, 2009).

Um estudo, no entanto, avalia que o sistema de Estocolmo falhou, pois ao levar em consideração os custos de implementação, os ganhos ambientais, custos e benefícios às finanças públicas e os custos e benefícios de mercados secundários imperfeitos, o benefício líquido é negativo (Kopp e Prud’homme, 2010).

3.2 Londres

O sistema de tarifação de Londres entrou em vigor no dia 17 de Fevereiro de 2003 e teve sua área expandida para o oeste (*Western Expansion*) em 19 de Fevereiro de 2007. No entanto, esta área de expansão deixou de ser tarifada em 4 de Janeiro de 2011. A área de cobertura atual é de aproximadamente 21 km². A Figura 3.3 ilustra a área sujeita à cobrança, discriminando também a antiga zona oeste de expansão.

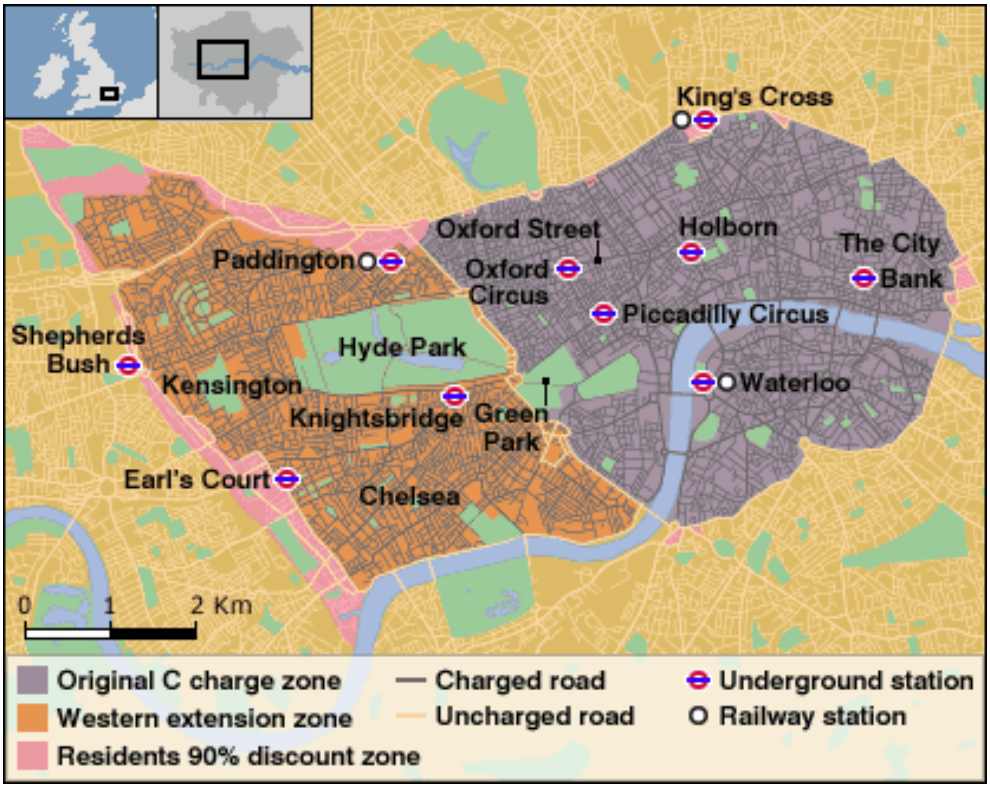
O período de tarifação é de Segunda a Sexta, das 7h às 18h. Fora deste horário, o trânsito pela região é gratuito.

O sistema possui abrangência zonal, com a tarifa sendo cobrada uma vez ao dia (*flat rate*). Em sua inauguração, a tarifa era de £5 e foi aumentado para £8 em Julho de 2005. Após outro aumento em Janeiro de 2011, a tarifa está estipulada hoje em

[2] Conversão feita em 19/02/2015 no site da Google: https://www.google.com/search?q=1900+sek+in+brl
[3] Conversão feita em 19/02/2015 no site da Google: https://www.google.com/search?q=220+sek+in+brl

£10 (cerca de R$ 44,19[4]). Há a opção de pagar a tarifa no dia seguinte, porém com um acréscimo de £2. Caso o pagamento não seja realizado nem no dia anterior nem no dia seguinte, o indivíduo é multado.

Figura 3.3 Área de tarifação do *London Congestion Charge* com indicação da área original e expansão oeste.



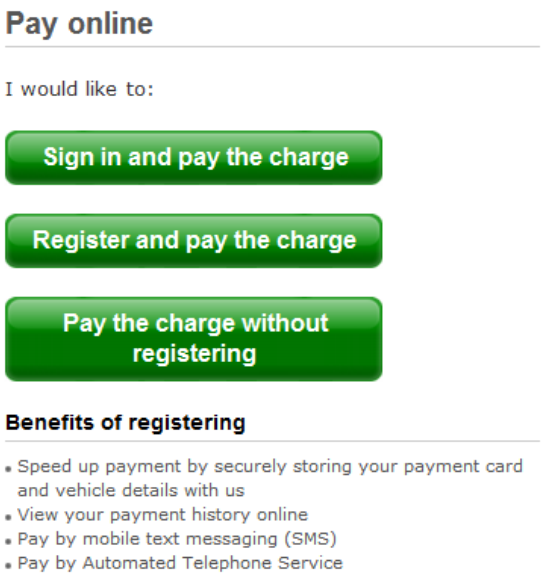
Fonte: (BBC News, 2007)

Os veículos isentos incluem motocicletas, bicicletas, taxis, veículos de serviços emergenciais, veículos militares, entre outros. Há também desconto de 90% para residentes da zona tarifada.

Existe a possibilidade de se pagar a tarifa eletronicamente pelo sítio da internet da *Transport for London* e também por mensagem de texto SMS, como ilustrado na Figura 3.4.

[4] Conversão feita pelo site da Google em 19/02/2015: https://www.google.com/search?q=10+gbp+in+brl

Figura 3.4 Formas de pagamento da tarifa em Londres



Fonte: (Transport for London, 2003b)

As áreas tarifadas da cidade são claramente identificadas com sinalização vertical e horizontal.

Figura 3.5 Sinalização vertical e horizontal indicando zona tarifada em Londres

Fonte: (Archdeacon, 2008)

A fiscalização é realizada por um conjunto de 197 câmeras espalhadas pela cidade. As câmeras são todas integradas a um sistema de reconhecimento automático de

placas. Para a emissão das multas, há comunicações também com a Agência de Licenciamento de Motoristas e Veículos (Transport for London, 2011).

Segundo documentos da *Transport for London*, a redução do volume de tráfego na zona tarifada foi de 15%, resultando em uma queda de 30% no congestionamento. Houve, também, um aumento de 23% no número de viagens realizadas por meio do transporte público coletivo, metade da qual se acredita ser atribuível ao sistema de *congestion charging*. Ao contrário do esperado, notou-se uma diminuição no volume de veículos nas vias perimetrais, ao redor da área tarifada (Transport for London, 2004).

Pôde-se observar uma queda no setor de varejo da zona tarifada, porém a parcela deste fenômeno diretamente ligada ao *congestion charging* é difícil de medir. A partir de modelos econométricos, estima-se que o sistema de *congestion charging* possa ser responsável por uma queda da ordem de 5,5% nas vendas (Quddus *et al.*, 2007). Outros fatores que também favoreceram esta queda foram o desligamento de uma linha de metrô; medo por parte da população de ataques terroristas; uma crise econômica; e aumento de competição de outras regiões.

Houve tentativas de se medir o impacto do *congestion charging* na qualidade do ar em regiões centrais, regiões lindeiras e regiões afastadas da zona de tarifação, porém os resultados foram de difícil interpretação e não conclusivos, uma vez que o *congestion charging* foi introduzido paralelamente com outras medidas de redução de congestionamento. Mesmo com estas dificuldades, mostrou-se que os resultados nem sempre refletem o esperado: houve aumento nos valores medidos de NO_2 e O_3 (Atkinson *et al.*, 2009).

3.3 Cingapura

Cingapura é hoje uma cidade-estado que abrange 714 km² e contém cerca de 5,3 milhões de pessoas (Ho *et al.*, 2013).

Para gerir a demanda, utilizam-se restrições ao crescimento da frota de automóveis, bem como técnicas de desincentivo do uso do automóvel. As restrições ao crescimento da frota buscam mantê-la em níveis aceitáveis e tratáveis, enquanto

que o sistema de desincentivo busca alertar o viajante do custo que a sua viagem causa (Yap e Gwee, 2005).

Em 1975 iniciou-se o *Area Licensing Scheme* (ALS), um sistema manual com base em papel para a redução do congestionamento no *central business district* (CBD) da cidade. Em 1998, o ALS foi substituído pelo *Electronic Road Pricing System* (ERP), que permanece em operação até hoje. Na Figura 3.6 pode-se ver a delimitação da área tarifada (*restricted zone* – RZ) do antigo ALS (720 hectares) e que permanece até hoje.

Figura 3.6 Área tarifada em Cingapura

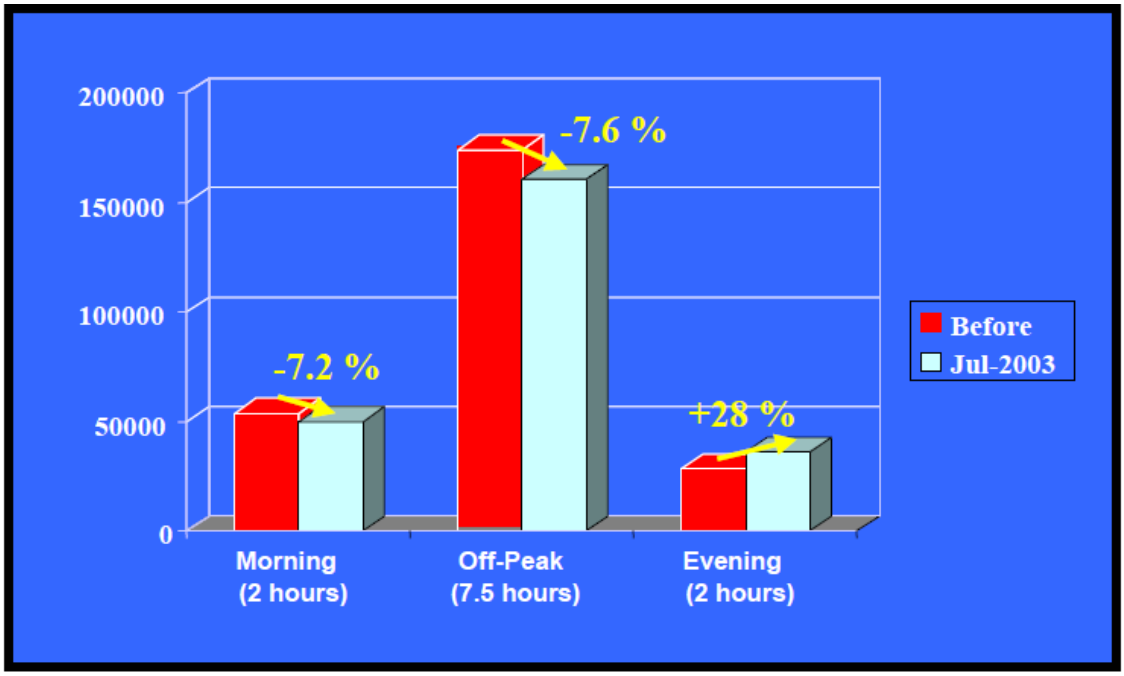
Fonte: (Yap e Gwee, 2005)

As tarifas aplicadas no ERP são revisadas a cada três meses. As decisões quanto às mudanças das tarifas são feitas por meio do estudo das velocidades observadas na área restrita. As velocidades médias das vias são averiguadas por táxis e por "*probe vehicles*" munidos de GPS. As tarifas sobem ou descem conforme o comportamento das velocidades observadas (Yap e Gwee, 2005).

Após seis anos da substituição do ALS, notou-se que o ERP reduziu o volume do tráfego no CBD durante o horário de pico da manhã e as horas fora do pico em aproximadamente 8%, quando comparado com os volumes do ALS – comportamento visível na Figura 3.7. No entanto, na mesma figura pode-se verificar

um aumento de 28% no volume do tráfego durante o horário de pico da tarde. Este fenômeno pode ser explicado pelo baixo custo de dirigir à tarde quando comparado à época do ALS (Yap e Gwee, 2005).

Figura 3.7 Efeitos do ERP em Cingapura 6 anos após a sua implantação



Fonte: (Yap e Gwee, 2005)

3.4 Comentários finais

Os casos internacionais apresentados nesta seção mostram que existe espaço para o desenvolvimento de soluções como o *congestion charge* para cidades de grande porte com problemas de transportes e congestionamento. No entanto, ressalta-se que cada local e cada sistema apresentado tem as suas particularidades. No caso de se implementar em São Paulo um sistema de *congestion charging* semelhante aos aqui apresentados, não se pode deixar de lado as características particulares e circunstâncias da realidade paulistana.

4 ALTERNATIVAS PARA SÃO PAULO

Neste capítulo são levantadas alternativas de sistemas de c*ongestion charging* para a cidade de São Paulo. Também são apresentados alguns dos principais passos a serem tomados para a sua implantação.

Na seção 2.2.2.1, foram evidenciados três grandes tipos de sistemas diferentes:

- Sistemas de zonas;
- Sistemas de cordão;
- Sistemas de vias específicas.

Cada um desses sistemas exige a elaboração de estudos específicos. Serão abordados aqui os principais pontos a serem considerados para cada um desses sistemas.

Os estudos e programas a serem desenvolvidos que são comuns aos três sistemas são:

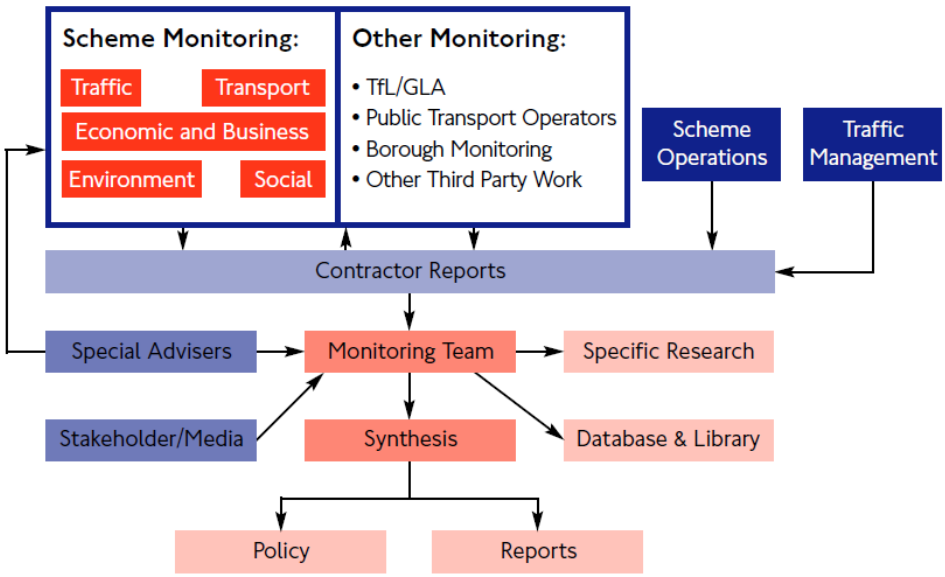
- Programa de monitoração de congestionamentos que proporcione dados confiáveis (com informações georreferenciadas e com *timestamp*) de velocidades e de volumes classificados de tráfego nas principais vias da cidade. Além das vias dentro do centro expandido, também devem ser monitoradas vias externas;
- Estudo das capacidades das principais vias da cidade e dos sistemas de transportes públicos;
- Pesquisas para compreender a estrutura de tomada de decisão do usuário e a sua percepção frente a sistemas de *congestion charging* (pesquisas de preferência declarada ou de disposição a pagar, por exemplo);
- Elaboração de modelo para simulação. Este modelo deve ser gerado com o propósito específico de avaliar os impactos do sistema de *congestion charging* na região estudada;
- Estudo do aumento de oferta de transporte coletivo necessário para se adequar ao aumento de demanda gerado pelo sistema de *congestion charging*. Este estudo deve contemplar não só o aumento de oferta necessário, mas também os custos e receitas associados;

- Programa de monitoração dos sistemas de transportes públicos coletivos para averiguar o cumprimento de níveis de serviços operacionais mínimos, a fim de garantir o bom funcionamento do sistema de *congestion charging*;
- Levantamento de tecnologias disponíveis (e seus respectivos custos) para a identificação e cobrança dos usuários que entrem na área do sistema de *congestion charging*;
- Determinação dos pontos a receberem postos de identificação de usuários (*gantries*) que entram na área do sistema de *congestion charging*. Este estudo dependente da tecnologia utilizada.
- Elaboração de sistemas para pagamento das tarifas – pagamento pela *internet*, pelo celular, em bancas e lojas;
- Para a redução dos custos de transações financeiras, deve ser elaborado um sistema que possibilite o pagamento de múltiplas tarifas de uma única vez, tais como passes mensais;
- Definição dos dias e horários de operação e suas respectivas faixas de preços;
- Estipulação de descontos, isenções e multas;
- Estimativas de receitas, considerando cenários pessimistas e otimistas. Este estudo deverá ser baseado em outros já mencionados, como os estudos de congestionamentos, os estudos de comportamento do usuário e as simulações realizadas com os modelos;
- Programa de monitoração do próprio sistema de *congestion charging* a fim de garantir níveis mínimos operacionais e registrar dados importantes, como o número de veículos pagantes por dia, por faixa horária;
- Programa para melhoria e atualização do cadastro de automóveis;
- Estudos de como lidar com automóveis que não sejam da cidade de São Paulo;
- Estudos relativos às formas de financiamento do sistema;
- Programa de conscientização por meio de campanhas publicitárias (vídeos e panfletos educativos), audiências públicas e notícias em jornais e revistas;
- Estabelecimento de canal de comunicação com o público para se tirar dúvidas sobre o sistema, como horários de funcionamento e valores cobrados;

- Estabelecimento de canal de comunicação com o público para compreender as vontades públicas relativas ao investimento do dinheiro arrecadado com o *congestion charge*;
- Estabelecimento de canal de comunicação com o público para contestação de cobranças;
- Programa de divulgação periódica de resultados do sistema;
- Programa que garanta a transparência do sistema e o reinvestimento no sistema de transportes urbano;
- Estudo da legislação relacionada e definição da categoria de cobrança (taxa, imposto, tributo, contribuição ou empréstimo compulsório) na qual o *congestion charge* se encaixa. Este estudo deve englobar também todos os outros aspectos legais relacionados;
- Programa de monitoração da qualidade do ar e de outros aspectos ambientais;
- Programa de monitoramento de acidentes e atropelamentos;

A Figura 4.1 resume o esquema de monitoração implantado no sistema de *congestion charging* de Londres e que pode ser aplicado às três alternativas destacadas.

Figura 4.1 Esquema de monitoração usado em Londres



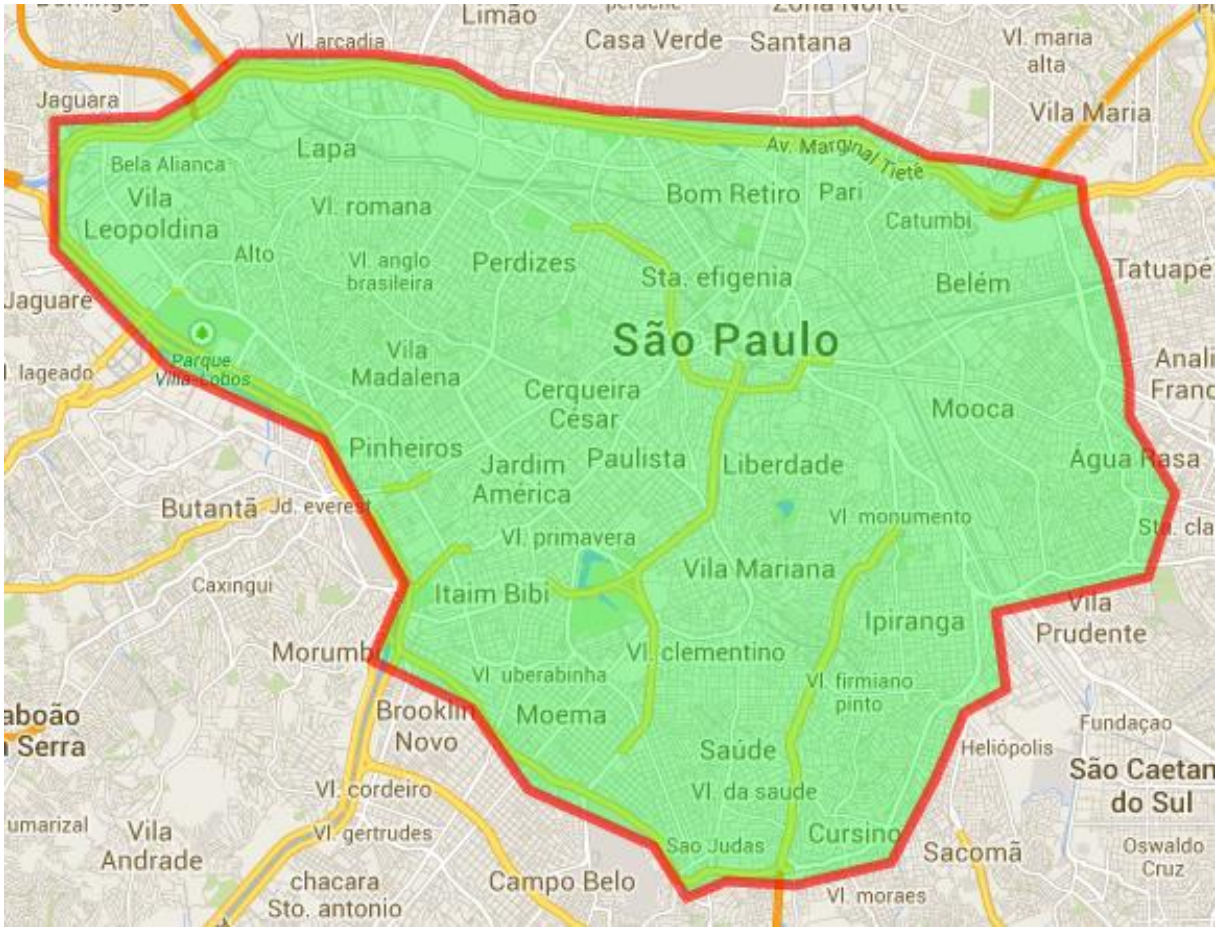
Fonte: (Transport for London, 2003a)

A implantação do *congestion charge* poderia também passar por uma etapa de teste, conforme o exemplo de Estocolmo. Nesse caso, o *congestion charge* entraria em vigor por um período de seis meses ou um ano, após o qual haveria um referendo (ou alguma outra forma de participação pública) para decidir a permanência ou não do sistema.

4.1 Sistema de zonas

Nesse caso, a área do Centro Expandido de São Paulo seria passível de consideração, conforme ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 Sistema de zonas no Centro Expandido de São Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2010).

O sistema de *congestion charging* zonal pode ser concebido como uma substituição ao atual programa do Rodízio Municipal. Sendo assim, devem ser estudados os possíveis impactos da extinção desta restrição. Também se deve estudar a possibilidade de adaptação da infraestrutura utilizada atualmente no programa do Rodízio para o novo sistema de *congestion charging*.

Uma política desta natureza pode também causar impactos no uso do solo e do espaço urbano no médio e longo prazo. Devem ser elaborados, portanto, programas de monitoração para compreender essas mudanças e legislação apropriada para controlá-las.

Após a implantação de um sistema zonal, espera-se que haja uma diminuição na quantidade de veículos que entram no centro expandido, um aumento na velocidade dos automóveis dentro do centro expandido e um aumento da participação do transporte coletivo na divisão modal. O sistema de monitoração de congestionamento deve estar preparado para fazer essas medidas.

4.2 Sistema de cordão

Uma área envolvendo o Centro Expandido de São Paulo seria passível de consideração no caso de um sistema de cordão, conforme pode ser visto na Figura 4.3.

Para avaliar a implantação deste tipo de sistema, deve ser elaborado um estudo de congestionamento focado na região do Centro Expandido de São Paulo, considerando viagens que têm início, fim ou atravessam a região. Este estudo deve ser elaborado especificamente para averiguar a real influência das viagens que cruzam a fronteira do Centro Expandido no congestionamento da cidade. Se o estudo indicar que as viagens que cruzam a fronteira não são as que causam congestionamento na cidade, é pouco provável que um sistema desses melhore o congestionamento urbano.

Um sistema desses pode, no longo prazo, estimular o adensamento dentro do centro expandido, trazendo uma maior eficiência para o sistema de transportes coletivos. Os impactos dessa política de transportes no uso do solo e espaço urbano devem ser então monitorados por meio de programa específico

Figura 4.3 Sistema de cordão envolvendo o centro expandido de São Paulo

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia de Engenharia de Tráfego, 2010).

De forma semelhante ao sistema zonal, é necessário estudar a adaptabilidade da infraestrutura utilizada hoje no programa do Rodízio Municipal para auxiliar na fiscalização do sistema de *congestion charging*.

A implantação deste sistema deve contar com uma redução do número de travessias da fronteira e um aumento da demanda do sistema de transportes públicos. Para avaliar a eficiência do sistema, programas de monitoração específicos devem ser desenvolvidos para avaliar estas variáveis.

4.3 Sistema de vias específicas

No caso de aplicação do *congestion charge* a uma via específica, uma grande avenida como a Avenida 23 de Maio ou mesmo as Marginais do Rio Pinheiros e do Rio Tietê são passíveis de consideração.

Figura 4.4 Sistema de vias específicas – Av. 23 de Maio

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse caso, devem ser realizados estudos detalhados nas entradas e saídas da via estudada a fim de se compreender os principais movimentos nela realizados. O ideal seria desenvolver não só pesquisas de contagem volumétrica classificada, mas também de origens e destinos e de velocidades nos seus vários segmentos.

Devem ser monitoradas também as vias vizinhas, com o intuito de compreender como funcionará a redistribuição do volume de tráfego e a nova escolha de rotas dos motoristas.

Além disso, deve ser estudada também a possibilidade (e os consequentes impactos) de dar isenção do *congestion charge* a veículos que possuam altos índices de ocupação, dando à operação um caráter semelhante às *HOT Lanes*

existentes nos EUA. Caso se opte por essa forma de operação, deve ser escolhida uma tecnologia que possibilite a aferição da ocupação do automóvel.

Deve ser estabelecido também programa de monitoramento que seja capaz de captar a evolução da taxa de ocupação dos veículos na via em questão.

Para esses sistemas, pode-se esperar uma redução do volume de tráfego na via devido ao *congestion charge*, porém uma parte desse volume pode ser desviado para vias vizinhas. Além disso, pode-se esperar que haja um incremento na taxa de ocupação, efeito esse potencializado no caso de implantação de sistema análogo às *HOT Lanes*.

5 METODOLOGIA

A seção metodológica do presente trabalho é dividida em duas partes:

- Elaboração de modelo de escolha discreta entre TI e TC; e
- Avaliação da capacidade do sistema de Transporte Coletivo da RMSP.

Elaborou-se um modelo de escolha discreta para avaliar a probabilidade de escolha de modo das pessoas entre as alternativas "Transporte Individual" (TI) e "Transporte Coletivo" (TC) caso seja implementado um sistema de *congestion charging* na RMSP. Esta análise foi feita com base nos dados da Pesquisa Origem-Destino do METRÔ de 2007 (OD 2007), a base de dados viários da Open Street Maps, a ferramenta de rede GraphHopper e o software econométrico STATA.

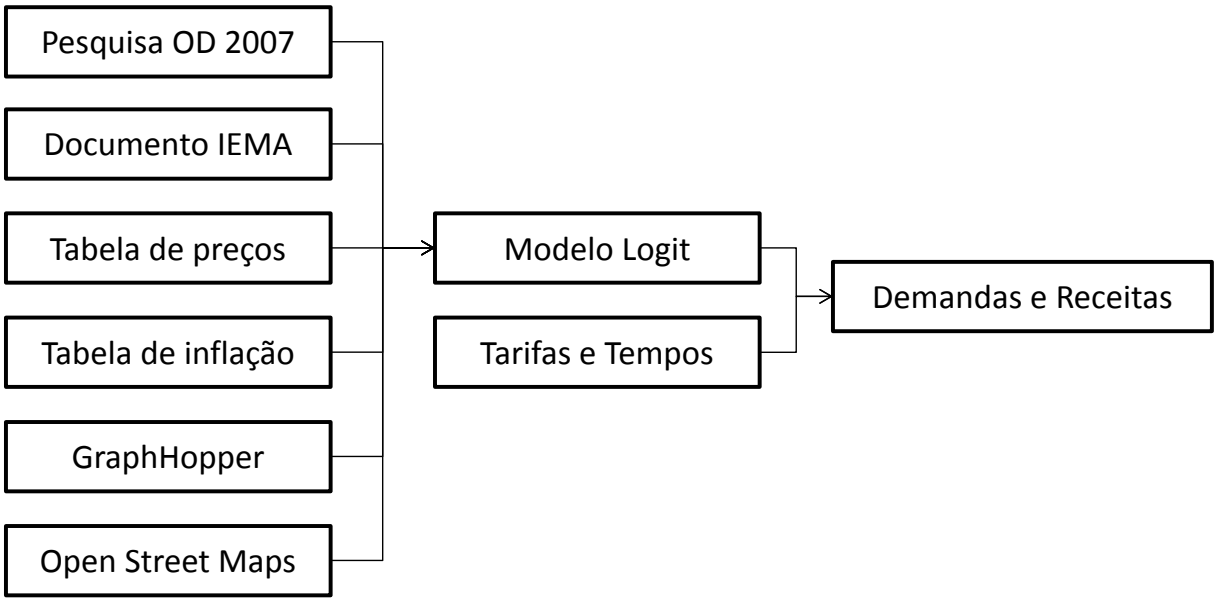
Já a segunda etapa buscou avaliar quantas vagas ainda existem no atual sistema de Transporte Coletivo da RMSP. Considerando que a implementação de um sistema de *congestion charging* fará com que alguns passageiros que atualmente utilizam o Transporte Individual migrem para o Transporte Coletivo (passageiros estes denominados no presente trabalho como "passageiros deslocados do TI"), busca-se avaliar se o sistema de Transporte Coletivo atual possui capacidade o suficiente para receber estes passageiros deslocados do TI. Esta etapa foi desenvolvida com os dados de bilhetagem do METRÔ, CPTM e da SPTrans, bem como os dados de GPS dos ônibus da SPTrans. As ferramentas para esta etapa foram desenvolvidas pelo presente autor na linguagem de programação Python, versão 2.7.9.

Dadas diversas dificuldades relacionadas com a base de dados de bilhetagem e de GPS dos ônibus, o presente autor limitou-se a fazer o cálculo da capacidade apenas para uma viagem de um único veículo. O intuito foi de ilustrar que este cálculo é possível com os dados disponíveis. No entanto, conforme será descrito na seção 6.2, a operacionalização e automatização deste processo pode ser bastante complexa.

5.1 Modelo de escolha discreta

A metodologia da etapa de modelagem de escolha discreta encontra-se resumida na Figura 5.1.

Figura 5.1 Metodologia da etapa de modelagem de escolha discreta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustra a Figura 5.1, inicialmente estudaram-se os dados da Pesquisa Origem-Destino do METRÔ de 2007 (OD 2007).

Utilizou-se um documento do IEMA (Gomide e Morato, 2011) para identificação dos custos do Transporte Individual. De forma análoga, foram encontradas reportagens e tabelas de preços para encontrar os custos associados ao sistema de Transporte Coletivo. Dados de inflação foram necessários uma vez que as informações dos custos utilizadas não são todas referentes a 2007 (ano da pesquisa OD 2007).

Também foi utilizada a base viária da RMSP presente na base Open Street Maps em conjunto com a ferramenta de redes GraphHopper. Desta forma, foi possível estimar os custos do Transporte Individual e identificar as viagens que utilizaram o centro expandido.

As informações contidas na base de dados da OD 2007 e os custos estimados possibilitaram a estimação de modelos logit.

Após a escolha do modelo a ser utilizado, foram avaliados diversos cenários tarifas e de alterações dos tempos de viagem. Para estes cenários calcularam-se as demandas e receitas advindas de um sistema de *congestion charging*.

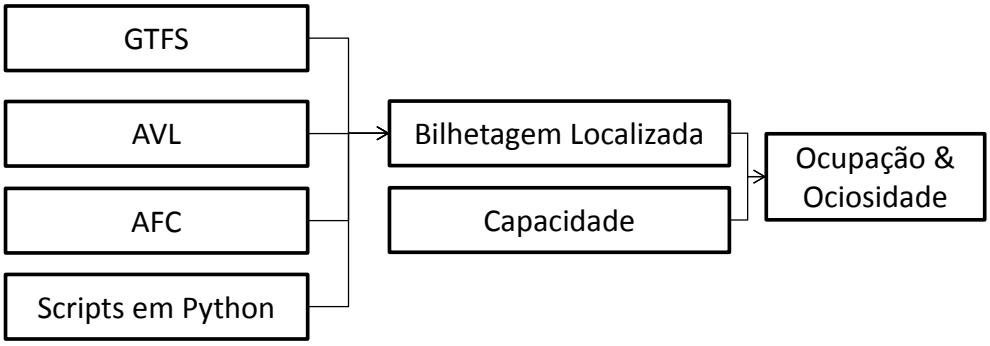
Vale mencionar que o Apêndice A – Modelos de escolha discreta contém toda a base conceitual e teórica na qual se baseou esta etapa.

5.2 Estudo de capacidade do sistema de Transporte Coletivo

Esta etapa buscou avaliar o atual sistema de Transportes Coletivos e indicar se a oferta atual possui capacidade para acolher a demanda adicional resultante do sistema de *congestion charging*.

A metodologia desta etapa encontra-se resumida na Figura 5.2.

Figura 5.2 Metodologia da etapa de estudo de capacidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

As informações sobre a oferta de transportes (representada pelo GTFS – *General Transport Feed Specification*) foram associadas aos dados de localização dos ônibus (representados pelo AVL – *Automated Vehicle Location*) e aos dados de bilhetagem (representados pelo AFC – *Automated Fare Collection*) por meio de *scripts* desenvolvidos em Python. Dessa forma, obteve-se uma base de dados de bilhetagem georreferenciada.

Por fim, os dados de bilhetagem georreferenciados foram associados a informações de capacidade dos ônibus para estimar as condições de ocupação e ociosidade.

Deve-se ressaltar aqui que, dada a complexidade desta avaliação, o presente autor analisou apenas uma viagem de um veículo em um único dia para ilustrar que este tipo de análise seria possível com os dados disponíveis. No entanto, conforme será ilustrado adiante, a base de dados possui inúmeras inconsistências que dificultam a operacionalização e a avaliação de todo o sistema de transportes coletivos da metrópole de forma automatizada.

Reitera-se, portanto, que esta seção serve principalmente para ilustrar que os cálculos são possíveis de serem feitos. Será mostrado adiante, no entanto, que a automatização deste processo será bastante complexa.

5.2.1 Conceitos de vaga quilômetro e ociosidade

Para a avaliação da capacidade, o autor propõe a criação de um indicador denominado "vaga quilômetro" (vaga*km), fortemente ligado ao conceito de "passageiro quilômetro".

O "passageiro quilômetro" (pax*km) é um indicador comum da Engenharia de Transportes que fornece informação sobre volumes de passageiros. Por exemplo, considere uma situação em que um ônibus *A* contendo 50 passageiros se desloca por 10 quilômetros, e um ônibus *B* com 30 passageiros se desloca por 10 quilômetros.

O cálculo é bastante simples e direto:

$$pax * km_A = 50\, passageiros \cdot 10\, quilômetros = 500$$

$$pax * km_B = 30\, passageiros \cdot 10\, quilômetros = 300$$

$$pax * km_{A+B} = 500 + 300 = 800$$

Nesta situação, há um deslocamento conjunto de um volume total de 800 pax*km.

Para a presente etapa, o autor propõe, portanto, que seja criado um indicador que leve em consideração não somente o volume dos passageiros transportados, mas também a capacidade do sistema atual. Com este indicador, busca-se compreender quantos pax*km ainda poderiam ser transportados pelo sistema em questão.

Portanto, considere o mesmo exemplo citado acima, agora com a informação adicional de que o ônibus *A* possui capacidade de 75 passageiros e que o ônibus *B* possui capacidade de 35 passageiros. O cálculo do indicador "vaga quilômetro" para esta situação seria:

$$vaga * km_A = (75 - 50)\ vagas \cdot 10\ quilômetros = 25 \cdot 10 = 250$$

$$vaga * km_B = (35 - 30)\ vagas \cdot 10\ quilômetros = 5 \cdot 10 = 50$$

$$vaga * km_{A+B} = 250 + 50 = 300$$

Note que, apesar do ônibus *A* carregar mais pessoas que o ônibus *B*, o seu índice "vaga quilômetro" é ainda superior, porque o ônibus *B* está viajando quase à capacidade máxima, enquanto que o ônibus *A* ainda possui 25 vagas.

Vale ressaltar que há pelo menos três formas de tratar com a ocupação acima da capacidade. Pode-se considerar que haja, de fato, vagas negativas, reduzindo o índice. Pode-se também adotar zero como o mínimo aceito. Outra possibilidade é: quando o veículo estiver acima da capacidade, o índice "vaga quilômetro" continua negativo, porém multiplicado por uma constante maior do que 1 para identificar uma forma de penalização por superlotação. A forma de tratar com esta questão dependerá do objetivo da análise.

Conhecendo-se a capacidade total do veículo em questão, pode-se avaliar a ocupação em termos percentuais com auxílio do índice "assento quilômetro" (assento*km). Tomemos novamente o caso dos ônibus *A* e *B* já citados. O cálculo do "assento quilômetro" é uma multiplicação simples entre a capacidade do veículo e a distância total percorrida:

$$assento * km_A = 75\ assentos \cdot 10\ quilômetros = 75 \cdot 10 = 750$$

$$assento * km_B = 35\ assentos \cdot 10\ quilômetros = 35 \cdot 10 = 350$$

$$assento * km_{A+B} = 750 + 350 = 1100$$

Note que o termo "assento" não se refere a assentos de fato, mas sim a um número indicativo da quantidade de pessoas que o veículo comporta (capacidade), quer as pessoas estejam de pé ou sentadas.

Com o cálculo do índice "assento quilômetro", pode-se avaliar a ocupação dos ônibus em termos percentuais da seguinte forma:

$$ocupação_A = \frac{pax * km_A}{assento * km_A} = \frac{500}{750} = 66\%$$

$$ocupação_B = \frac{pax * km_B}{assento * km_B} = \frac{300}{350} = 86\%$$

$$ocupação_{A+B} = \frac{pax * km_A + pax * km_B}{assento * km_A + assento * km_B} = \frac{500 + 300}{750 + 350} = 73\%$$

Analogamente, pode-se avaliar a ociosidade da capacidade dos ônibus em termos percentuais através do vaga*km e do assento*km:

$$ociosidade_A = \frac{vaga * km_A}{assento * km_A} = \frac{250}{750} = 33\%$$

$$ociosidade_B = \frac{vaga * km_B}{assento * km_B} = \frac{50}{350} = 14\%$$

$$ociosidade_{A+B} = \frac{vaga * km_A + vaga * km_B}{assento * km_A + assento * km_B} = \frac{250 + 50}{750 + 350} = 27\%$$

No exemplo ilustrado, a ocupação e a ociosidade são complementares (somam 100%). Este será o caso quando forem permitidos valores negativos para o vaga*km e não for aplicado fator de penalização para ocupações acima da capacidade. No entanto, quando o vaga*km for limitado a zero, ou qualquer outra regra for adotada para trabalhar com ocupações acima da capacidade, o índice de ociosidade poderá ser distorcido e a soma entre ocupação e ociosidade poderá ser diferente de 100%.

6 APLICAÇÃO PARA O CASO DE SÃO PAULO

O presente capítulo é focado na aplicação da metodologia detalhada no capítulo 5 e é dividido em duas partes:

- Modelos de escolha discreta
- Estudo de capacidade.

6.1 Modelo de escolha discreta

6.1.1 Montagem do banco de dados para estimação

Para o presente trabalho, elaborou-se um modelo de escolha discreta que representasse o comportamento de pessoas perante a escolha entre os modos "Transporte Individual" e "Transporte Coletivo". Para fins de simplificação, estes modos foram denominados TI e TC, respectivamente.

Considerou-se que o TI está associado a viagens realizadas por automóvel (tanto como motorista quanto como passageiro) e que o TC está associado a viagens realizadas pelo sistema de ônibus, metrô e trens da RMSP. Mais detalhes sobre este assunto são esclarecidos na seção 6.1.1.2.

Antes de dar início à fase de proposição de formas funcionais da utilidade representativa e da estimação dos parâmetros dos modelos, elaborou-se um banco de dados que fornecesse informações relevantes para qualquer modelo que fosse proposto. As informações desejadas eram, por exemplo, a hora de pico da manhã, a quantidade de viagens nela realizadas, as escolhas modais e a divisão modal, o custo e tempo de ambas as alternativas (TI e TC) e variáveis socioeconômicas dos tomadores de decisão.

Para esta etapa, foram utilizados os dados da Pesquisa Origem-Destino do METRÔ de 2007 (OD 2007).

A OD 2007 é uma pesquisa domiciliar que buscou identificar os movimentos de um dia útil comum na Região Metropolitana de São Paulo em 2007. Para tal, a metrópole foi dividida em 460 zonas, das quais 320 pertenciam ao município de São Paulo, conforme ilustrado na Figura 6.1.

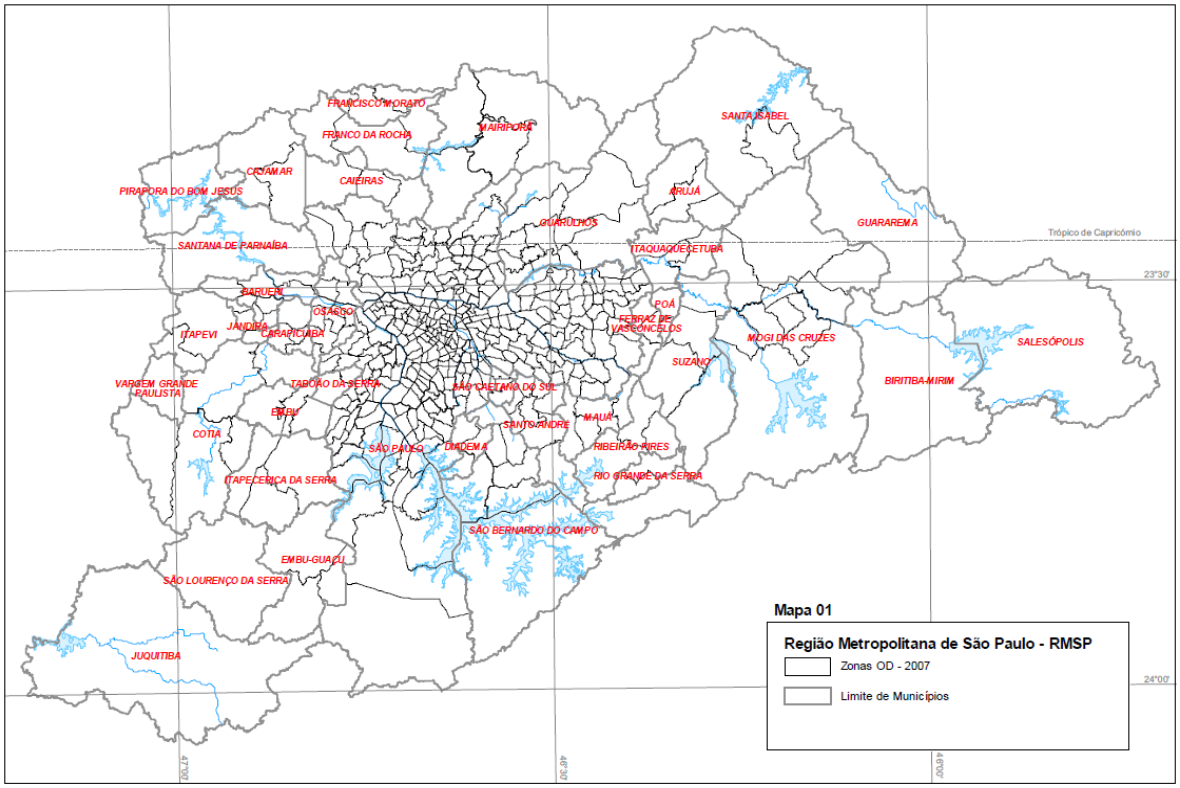
O banco de dados da OD 2007 contém uma listagem das viagens realizadas pelos membros dos domicílios entrevistados em um dia útil. O banco é, portanto, uma tabela onde cada registro (linha) é uma viagem e cada coluna é uma característica do domicílio, da família, da pessoa, da própria viagem ou dos vários deslocamentos da mesma viagem.

Dado que a OD 2007 não é um censo, as viagens são ponderadas e expandidas para que se chegue a um total estimado de viagens de toda a RMSP. Cada viagem possui, portanto, um fator de expansão de viagens (campo "FE_Via"), que identifica quantas viagens aquele registro representa. Em outras palavras, dada uma viagem no banco de dados que possua FE_Via = 200, entende-se que além daquela viagem presente no banco de dados, foram feitas outras 199 viagens com características idênticas.

O banco de dados apresenta campos que indicam os modos utilizados. Para o presente trabalho, esses modos foram simplificados em três grandes grupos: "Transporte Coletivo" (TC), "Transporte Individual" (TI) e "Outros".

As classificações de TI e TC utilizadas foram baseadas no campo “Modo Principal” do banco de dados da OD 2007 e a relação utilizada encontra-se na Tabela 6.1.

Figura 6.1 Zoneamento da Região Metropolitana de São Paulo



Fonte: (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008)

Tabela 6.1 Relação entre Modo Principal da OD 2007 e classificações TI/TC utilizadas

Modo Principal na OD2007	Classificação TI/TC Utilizada
Ônibus Município S.Paulo	Transporte Coletivo
Ônibus Outros Municípios	Transporte Coletivo
Ônibus Metropolitano	Transporte Coletivo
Ônibus Fretado	Transporte Coletivo
Escolar	Transporte Coletivo
Dirigindo Automóvel	Transporte Individual
Passageiro de Automóvel	Transporte Individual
Táxi	Transporte Individual
Microônibus/Van Município de S.Paulo	Transporte Coletivo
Microônibus/Van Outros Município	Transporte Coletivo
Microônibus/Van Metropolitano	Transporte Coletivo
Metrô	Transporte Coletivo
Trem	Transporte Coletivo
Moto	Não considerado
Bicicleta	Não considerado
A Pé	Não considerado
Outros	Não considerado

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

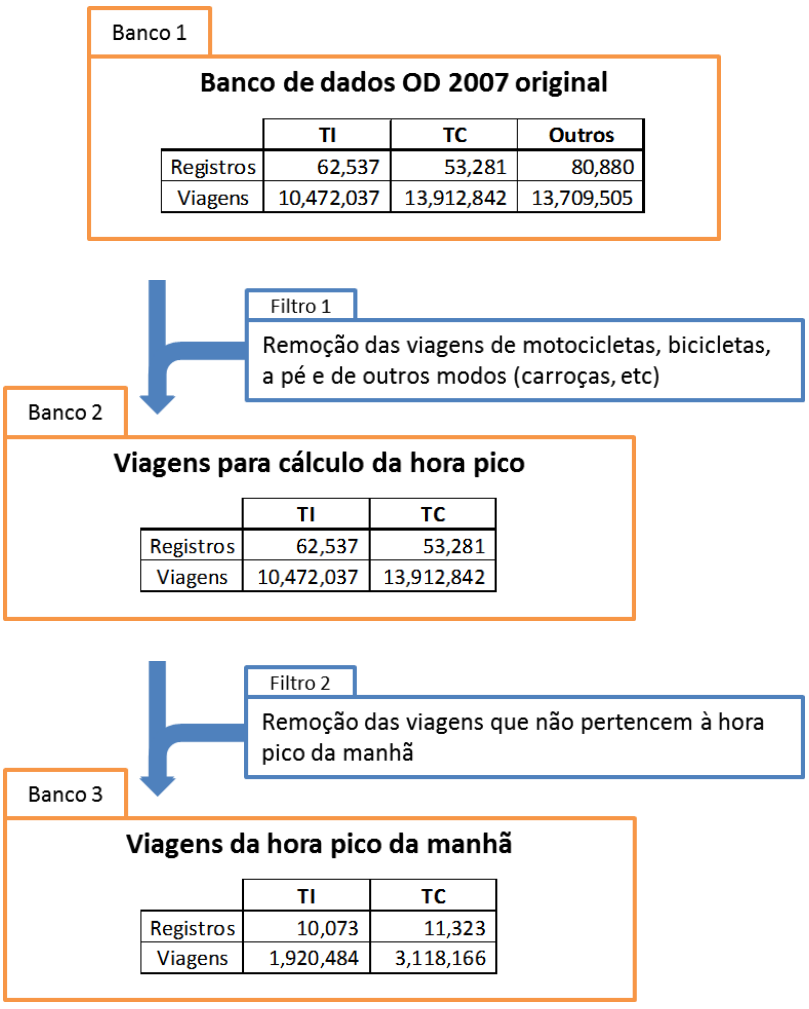
6.1.1.1 Filtros aplicados ao banco de dados

O banco de dados da OD 2007 contém quase 200 mil registros, representando um total de aproximadamente 38 milhões de viagens.

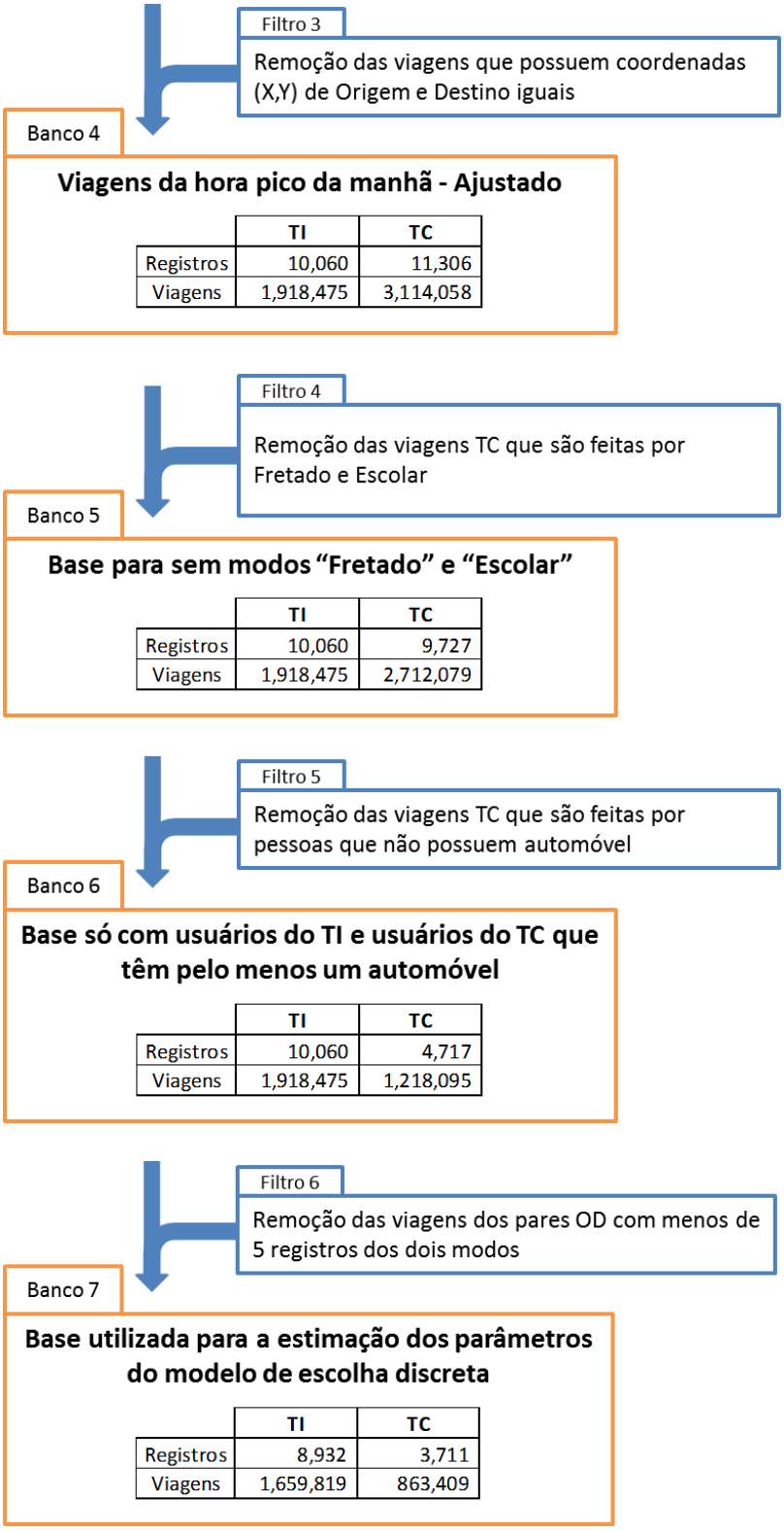
No entanto, algumas das características do modelo desejado exigem a seleção de um subconjunto dos registros presentes no banco. Um exemplo disso é o foco na hora pico: ao invés de trabalhar com todos os 200 mil registros, filtram-se os dados e trabalha-se apenas com os registros da hora pico.

Aqui são apontados os diversos filtros aplicados à base OD 2007, os motivos de suas aplicações e, a cada etapa, características como quantidade de registros e total de viagens de cada modo. A Figura 6.2 ilustra a sequência dos filtros realizados desde o início, partindo da base de dados original da OD 2007. Um resumo dos filtros aplicados e da perda de informação ocorrida em cada uma das etapas pode ser encontrado na Tabela 6.2.

Figura 6.2 Sequência de filtros aplicados e bancos de dados intermediários gerados



(continuação)



Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

Tabela 6.2 Resumo da sequência de filtros aplicados ao banco de dados da OD 2007

	Informações nos Bancos de Dados				Perda de Informação por filtro				
	Registros		Viagens		Registros		Viagens		
	TI	TC	TI	TC	TI	TC	TI	TC	
Banco 1	62,537	53,281	10,472,037	13,912,842	0	0	0	0	Filtro 1
Banco 2	62,537	53,281	10,472,037	13,912,842	52,464	41,958	8,551,553	10,794,676	Filtro 2
Banco 3	10,073	11,323	1,920,484	3,118,166	13	17	2,008	4,108	Filtro 3
Banco 4	10,060	11,306	1,918,475	3,114,058	0	1,579	0	401,978	Filtro 4
Banco 5	10,060	9,727	1,918,475	2,712,079	0	5,010	0	1,493,985	Filtro 5
Banco 6	10,060	4,717	1,918,475	1,218,095	1,128	1,006	258,656	354,685	Filtro 6
Banco 7	8,932	3,711	1,659,819	863,409					

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

O Filtro 1 foi realizado principalmente por se considerar que as viagens dos modos "bicicleta", "moto", "a pé" e "outros" possuem pouca ou nenhuma influência sobre o congestionamento da RMSP.

Para que se pudesse focar apenas na hora pico, aplicou-se o Filtro 2. Mais detalhes desta fase encontram-se na seção 6.1.1.2.

Aplicou-se o Filtro 3 por conta de a base conter alguns poucos registros com coordenadas de origem iguais às de destino. Dada a impossibilidade de analisar detalhes desta viagem, como, por exemplo, rota estimada, elas foram eliminadas da base. Note que há poucos registros com este problema: apenas 30 registros em um total de aproximadamente 21 mil.

O Filtro 4 foi aplicado apenas por uma dificuldade de se tratar com os modos "Escolar" e "Fretado". Pode-se argumentar que os usuários do modo "Escolar" não devem estar sujeitos a uma escolha entre os modos TI e TC, uma vez que geralmente são crianças sem poder de escolha sobre qual o modo de transporte a ser utilizado. Também pode-se argumentar que os usuários do modo "Fretado" utilizam um modo de transporte com características tão específicas (transporte coletivo privado com serviço "porta a porta" geralmente pago pela empresa) que a introdução de um sistema de *congestion charging* não afetaria a escolha de modo desses usuários.

Além disso, deve-se destacar a dificuldade de extrair informações sobre os custos destes dois modos. Por estas razões, estes dois modos foram excluídos da análise.

O Filtro 5, apesar de parecer bastante lógico a princípio (pessoas que não possuem automóveis não podem fazer viagens TI), impõe duas restrições ao modelo utilizado. Ao remover os usuários de TC que não possuem automóvel, está se afirmando que:

- Todos os usuários de TC considerados (após o filtro) possuem um carro à disposição para realizar a viagem por TI, o que pode não ser verdade. Por exemplo, considere uma família que possui apenas um único carro e na qual duas pessoas viajam durante a hora pico para destinos diferentes e distantes um do outro. Neste caso, é pouco provável que este único carro comporte ambas as pessoas da família. Portanto, a alternativa TI não está, de fato, disponível para todos os membros da família;
- Somente os usuários de TC que possuem automóveis podem considerar a possibilidade de tomar um Táxi ou de "pegar carona" com outro automóvel.

Apesar de estas restrições serem bastante fortes, o presente autor decidiu mantê-las. A não aplicação deste filtro poderia gerar situações absurdas, como, por exemplo, uma pessoa que não possui automóvel sendo oferecida a opção de viajar de carro.

O último filtro aplicado, o Filtro 6, se deve ao fato de o banco não conter informação suficiente para a estimação dos custos e tempos para todas as viagens (os detalhes de como os custos e tempos foram estimados encontram-se nas seções 6.1.1.3, 6.1.1.4 e 6.1.1.5). A seguir, exemplifica-se o porquê da necessidade deste filtro.

No caso de uma viagem ter sido realizada por TI, o banco de dados não terá informações sobre a viagem TC análoga. De forma mais clara: quando o banco de dados apresenta uma viagem por TI e nos informa a duração dessa viagem, o banco não contém informação sobre o tempo que essa viagem teria durado caso o usuário tivesse utilizado o TC. O mesmo pode ser dito sobre os custos. Ocorre, também, uma situação análoga com aquela descrita acima quando a viagem foi realizada por TC: há falta de informação sobre a viagem análoga de TI.

Portanto, para suprir esta falta de informação, deve-se lançar mão de alguma estimação das variáveis desconhecidas. Neste caso, as viagens foram agregadas

por pares OD (31 macrozonas) e estimaram-se os custos e tempos médios de TC e de TI de cada par.

Conforme esperado, diversos pares OD (31 macrozonas) apresentaram poucos (ou nenhum) registros de TI ou de TC. Para estes pares OD, as médias dos tempos e custos possuem poder explicativo reduzido. Portanto, foram utilizados apenas os pares OD que continham pelo menos cinco registros em ambos os modos. Deve-se notar que valores de corte mais altos implicariam na redução do volume de dados disponíveis para o presente autor.

Nas seções 6.1.1.3, 6.1.1.4 e 6.1.1.5 detalha-se como de fato foram estimadas as variáveis de custo e tempo dos modos TC e TI.

Vale destacar que os Filtros 1, 2, 3, 4 e 5 foram todos aplicados para eliminar registros irrelevantes à análise por conta da modelagem ou por conta de premissas adotadas pelo presente autor. No entanto, o Filtro 6 foi realizado por conta da falta de informação presente no banco. Isso faz com que este filtro não tenha sido de fato uma escolha do autor, mas sim uma imposição da própria base.

Portanto, dada a natureza do Filtro 6, decidiu-se trabalhar com novos fatores de expansão de viagens. Uma vez que o intuito da modelagem de escolha discreta era representar bem os indivíduos presentes no Banco 6 (após o Filtro 5), os registros do Banco 7 tiveram os seus fatores de expansão de viagem alterados para que se representasse o total de viagens do Banco 6.

6.1.1.2 Definição da Hora Pico da Manhã

Para a simplificação da análise e do modelo gerado, decidiu-se trabalhar apenas com os dados referentes à Hora Pico da manhã, ou seja, a hora em que são realizadas o maior número de viagens durante o período da manhã. Além de simplificar a análise, a Hora Pico concentra os maiores índices de congestionamento, um dos principais focos do presente trabalho.

Não há uma única forma para a determinação da hora pico. Aqui são apresentados três cálculos diferentes:

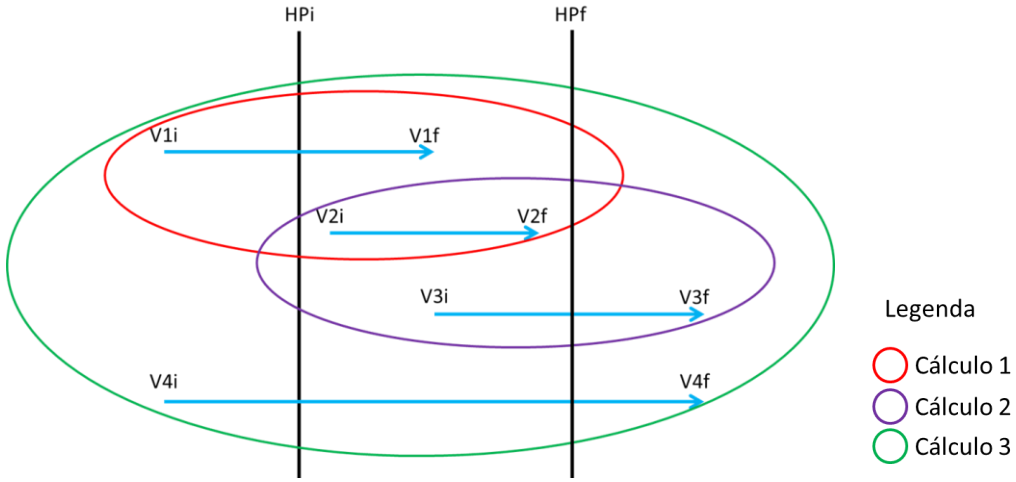
- Cálculo 1: viagens que terminam na faixa horária estudada
- Cálculo 2: viagens que se iniciam na faixa horária estudada
- Cálculo 3: viagens que “passam” pela faixa horária estudada.

Na Figura 6.3 há uma ilustração de todos os tipos de viagem em relação à hora pico e os possíveis cálculos para determiná-la.

Para a avaliação da hora pico no presente trabalho, utilizou-se o terceiro cálculo.

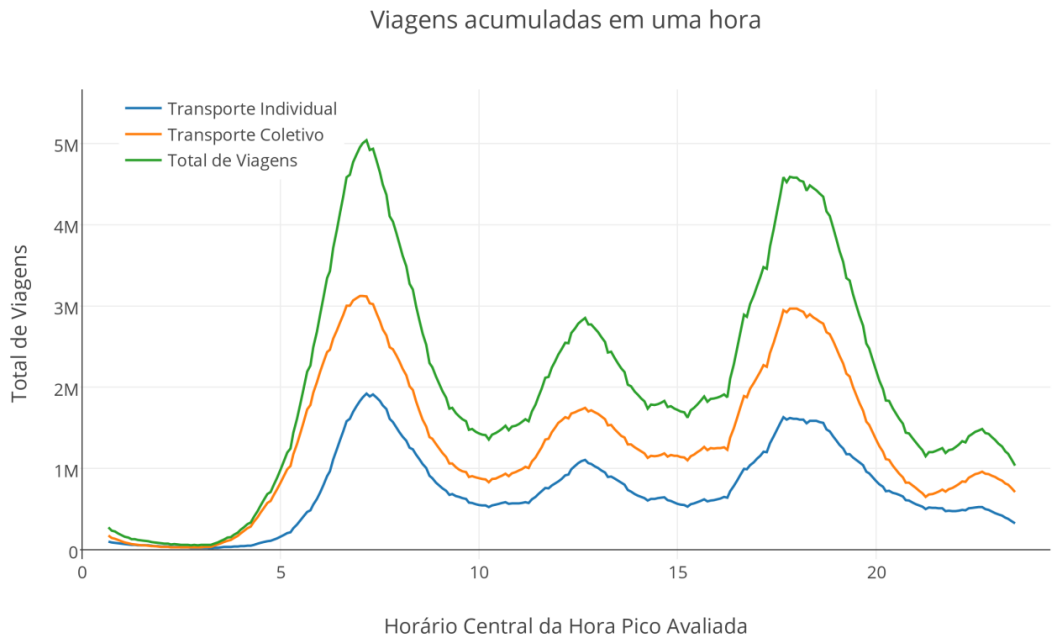
Sendo assim, chegou-se ao gráfico ilustrado na Figura 6.4.

Figura 6.3 Tipos de viagem e cálculos para determinação da hora pico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.4 Gráfico para definição da hora pico



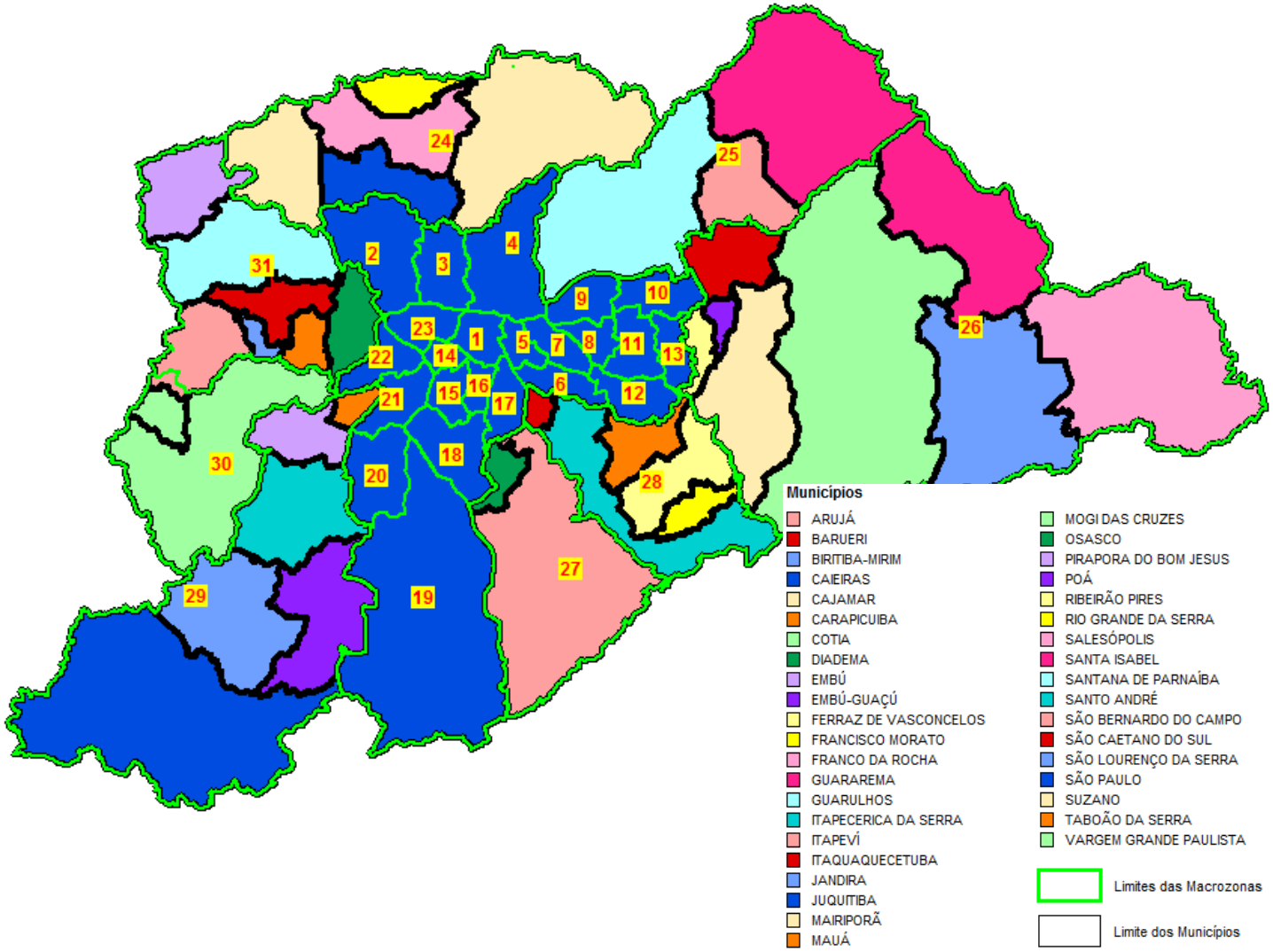
Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008). Versão interativa disponível em http://plot.ly/~phildias/309.

Pôde-se identificar que a hora pico da manhã de ambos os sistemas (individual e coletivo) situam-se entre 6h40 e 7h40. Nesta faixa horária, há cerca de 1,9 milhões de viagens por transporte individual e 3,1 milhões de viagens por transporte coletivo, totalizando cerca de 5,0 milhões de viagens. Neste cenário, o transporte individual conta com uma participação de aproximadamente 38%. Vale lembrar que agregações e metodologias diferentes levam a valores diferentes, portanto o fato de o valor aqui apresentado não ser igual àqueles de outros documentos não invalida nenhum dos estudos.

Como referência, é apresentada aqui a matriz de viagens OD da hora pico definida acima. No entanto, ao invés de se trabalhar com as 460 zonas originais, apresenta-se este resultado utilizando um zoneamento proposto pelo METRÔ que divide a região metropolitana em 31 macrozonas, conforme ilustrado na Figura 6.5.

A matriz de viagens entre as macrozonas durante a hora pico da manhã está representada na Tabela 6.3 e na Figura 6.6. Na Tabela 6.3 destacam-se os pares OD com maior número de viagens. Também na Tabela 6.3 destacam-se na cor vermelha as macrozonas pertencentes ao centro expandido de São Paulo.

Figura 6.5 Macrozonas usadas na Pesquisa OD do METRÔ de 2007



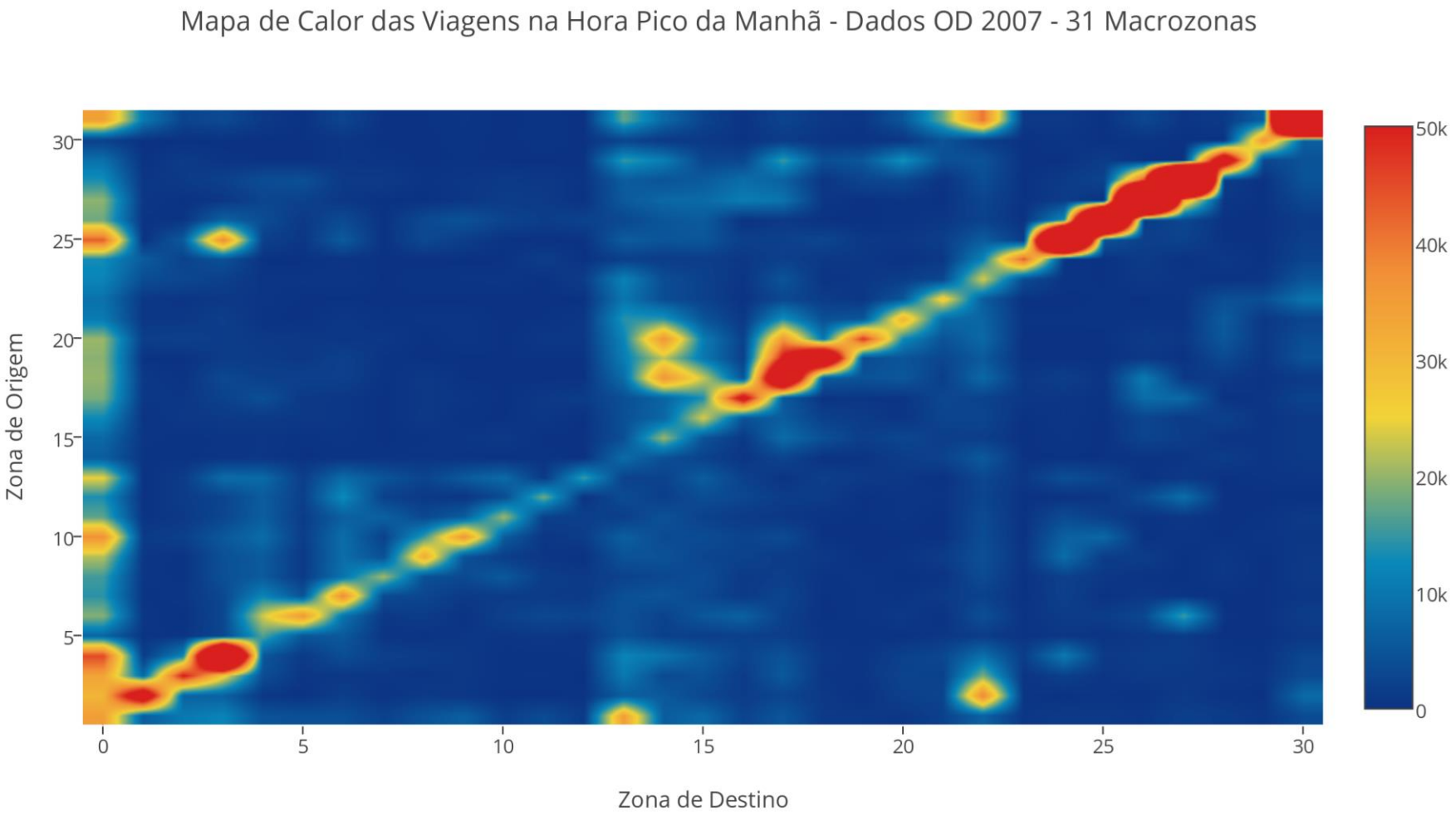
Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

Tabela 6.3 Matriz de Origens e Destinos entre as Macrozonas da RMSP

Origens \ Destinos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	34,838	6,296	10,365	11,981	4,567	4,243	4,180	2,162	4,597	6,521	1,666	3,555	1,164	34,838	6,042	8,035	2,305	5,164	1,005	884	548	2,038	6,946	627	1,056	924	634	1,833	1,315	597	3,465
2	30,494	66,541	6,754	6,733	687	0	1,617	154	1,007	661	0	0	194	6,296	5,582	2,859	1,380	2,550	845	0	1,778	2,449	38,931	305	0	315	0	1,022	155	0	8,353
3	33,924	7,794	50,904	26,818	3,770	544	636	642	362	755	259	345	0	10,365	3,274	4,299	1,168	5,706	416	406	2,461	1,989	18,671	362	1,705	432	1,038	852	763	434	3,372
4	45,551	1,276	11,901	121,165	5,266	1,031	3,889	1,837	1,314	842	116	116	348	11,981	9,538	5,727	2,359	4,662	727	326	1,909	2,947	8,941	1,490	10,507	925	1,207	1,302	371	121	2,735
5	7,372	242	385	2,823	16,594	4,974	5,690	339	173	566	490	763	372	4,567	1,947	1,537	1,919	1,623	299	148	0	623	1,344	156	594	242	749	1,192	0	0	676
6	19,316	497	0	2,645	23,489	36,347	9,519	712	1,286	0	1,946	3,090	2,563	4,243	2,204	5,289	6,857	1,855	0	336	840	0	4,050	185	1,245	1,283	3,041	15,610	156	0	1,460
7	14,254	157	465	2,912	12,162	4,796	38,144	3,442	2,853	933	1,318	1,087	884	4,180	4,890	2,954	920	2,638	62	335	232	1,054	2,078	0	1,902	0	716	360	0	68	577
8	15,517	426	202	4,196	5,845	935	9,393	20,831	4,078	3,315	5,650	1,328	990	2,162	2,951	3,738	890	1,706	202	385	0	170	3,538	0	2,018	691	177	0	732	0	952
9	21,723	552	137	4,264	5,803	886	8,625	4,281	32,849	4,351	1,568	482	0	4,597	4,473	2,561	2,159	1,169	886	0	202	1,270	4,226	228	8,486	1,378	1,383	0	694	0	915
10	37,019	1,025	1,813	5,380	8,428	1,422	8,566	2,028	15,101	36,482	6,062	466	1,348	6,521	3,407	3,626	2,294	3,518	0	0	13	0	3,652	0	6,749	7,758	0	469	0	419	607
11	16,991	165	843	2,727	6,276	1,298	6,581	6,827	2,941	6,129	20,576	1,752	1,806	1,666	4,461	2,061	1,080	605	176	88	354	0	3,309	0	3,534	1,724	185	721	0	166	1,067
12	13,392	0	1,300	2,517	6,060	1,850	12,912	2,012	831	412	3,486	18,156	156	3,555	1,618	3,870	2,898	1,287	1,262	0	425	299	2,509	0	0	381	3,434	8,808	0	0	0
13	24,785	0	1,234	8,349	8,161	1,514	8,456	4,873	2,402	5,715	8,234	922	15,358	2,181	2,186	6,146	2,014	188	1,631	1,035	696	0	2,931	596	4,154	2,539	0	936	0	320	514
14	6,333	245	91	471	522	34	141	234	464	170	0	209	0	8,305	4,130	2,112	381	2,525	80	219	1,346	2,219	5,699	94	51	103	184	381	1,257	413	940
15	7,905	405	168	312	517	113	457	0	250	527	875	0	51	4,068	20,392	4,569	820	8,463	4,224	1,607	2,889	1,490	1,603	0	339	0	2,547	1,435	339	375	1,014
16	12,792	191	764	930	1,004	825	582	0	844	85	65	616	0	4,184	7,560	23,991	4,644	6,043	1,913	1,208	267	2,485	2,648	0	516	0	2,784	1,142	2,028	242	1,019
17	18,681	565	584	2,040	4,178	873	573	0	769	499	0	906	1,282	3,998	7,207	13,652	57,187	5,545	245	399	336	2,899	2,197	628	477	158	8,588	7,900	0	351	2,366
18	20,064	766	124	3,089	1,864	1,968	1,913	70	879	81	76	0	96	8,414	36,695	22,959	4,679	86,920	5,534	4,477	5,405	1,564	7,919	674	1,618	210	10,769	871	912	200	968
19	19,514	25	40	1,220	1,136	690	2,100	203	0	0	111	0	106	10,937	22,225	9,998	1,743	52,538	85,987	3,593	4,845	2,766	5,644	0	0	0	714	0	3,305	464	4,572
20	20,325	1,545	1,982	1,294	918	811	451	758	0	494	0	706	720	12,030	36,800	10,636	2,036	36,360	10,015	47,623	12,841	4,559	7,960	0	0	0	1,163	665	5,417	743	3,766
21	10,405	706	627	1,606	126	0	692	148	362	462	0	113	609	14,162	14,390	4,743	689	13,597	4,132	4,940	31,166	8,328	7,281	157	152	194	294	230	5,883	684	2,523
22	9,240	630	356	752	435	0	63	0	30	0	0	0	0	9,854	3,717	2,014	33	2,974	1,253	537	5,255	27,110	6,085	0	0	154	0	322	4,070	4,040	9,533
23	12,054	3,762	2,882	1,801	345	380	480	66	275	313	413	61	1,346	11,700	3,753	1,958	337	4,777	289	573	1,380	2,792	23,853	3,493	211	70	821	398	64	427	4,883
24	13,086	5,943	2,153	4,497	0	0	403	0	0	0	0	1,489	0	1,692	1,309	1,587	687	1,924	721	721	0	712	11,701	42,953	324	0	1,122	95	782	0	2,452
25	43,140	0	5,809	38,361	1,864	494	5,925	0	3,168	1,467	115	0	0	6,101	4,836	5,058	1,697	1,894	2,791	735	686	1,572	6,117	1,371	168,063	4,761	1,712	2,145	104	0	1,757
26	17,943	202	277	6,866	3,780	836	3,484	0	3,225	4,592	2,383	1,429	2,187	2,900	5,021	5,815	53	876	0	0	168	573	2,215	0	12,918	161,670	1,243	2,928	0	0	1,230
27	19,772	568	0	551	2,608	2,129	598	0	0	529	1,251	1,046	0	5,661	7,812	8,155	10,969	9,511	515	0	327	0	2,624	0	1,305	0	219,305	32,239	591	0	2,919
28	13,417	492	979	1,884	3,701	4,142	986	1,093	233	572	896	811	221	5,937	4,785	5,794	8,535	6,727	408	2,497	3,089	95	3,913	0	1,046	2,440	45,929	241,317	1,355	0	4,680
29	9,063	0	1,177	233	93	0	512	280	0	137	0	0	0	14,972	11,134	2,627	2,754	15,238	3,972	5,201	13,804	4,096	4,702	0	0	1,316	0	0	69,613	2,887	4,624
30	1,884	0	0	0	0	0	527	0	0	221	0	278	0	2,417	828	881	0	1,159	278	0	424	4,684	1,431	0	412	0	278	0	0	36,743	6,357
31	34,521	10,209	2,359	3,353	849	0	2,602	0	79	343	0	224	0	17,388	7,957	2,336	164	2,409	834	528	5,022	17,778	40,558	950	948	0	2,980	393	1,002	6,637	257,112

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

Figura 6.6 Mapa de calor de viagens - Matriz OD da Hora Pico da Manhã



Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008). Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/283.

A matriz de viagens apresentada na Tabela 6.3 nos leva a crer que, na Hora Pico da Manhã, o centro da cidade raramente é utilizado como rota por conta do alto volume de viagens intrazonais (alta concentração de viagens que possuem origem e destino na mesma macrozona).

Para verificar se tal fato realmente ocorre, optou-se por apresentar os dados de forma georreferenciada. Foram gerados dois mapas:

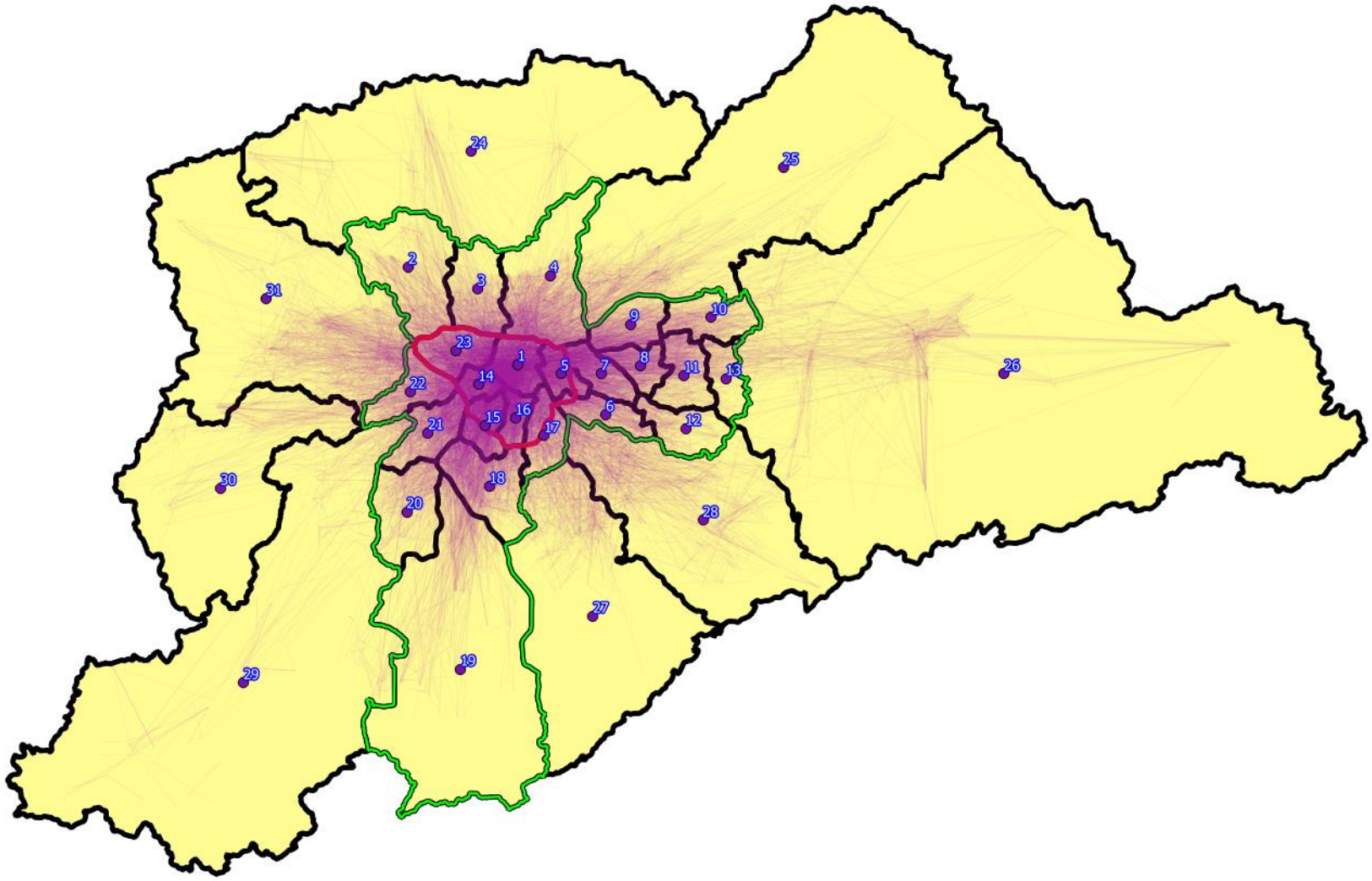
- Mapa de linhas de desejo das viagens da Hora Pico da Manhã: mapa onde cada viagem é representada por uma linha que vai da origem da viagem ao destino da viagem sem respeitar quaisquer limites geográficos e tampouco o sistema de transportes existente; e
- Mapa das rotas da Hora Pico da Manhã: foi utilizada a ferramenta de rede GraphHopper em conjunto com a base Open Street Maps para a estmação das rotas da hora pico. As rotas foram estimadas a partir das coordenadas (X, Y) dos pontos de origem e de destino das viagens da OD 2007.

Note que o GraphHopper calcula o caminho de menor distância entre dois pontos do sistema viário, considerando a rota de um automóvel em uma situação sem congestionamento. Portanto, há a possibilidade das rotas estimadas não serem iguais às rotas reais, especialmente no caso das viagens TC. No entanto, como o objetivo deste mapa é apenas ilustrar se as viagens da Hora Pico da Manhã "passam" ou não pelo centro, assumiu-se que esta simplificação seria razoável por hora.

A Figura 6.7 ilustra as linhas de desejo de viagem, enquanto a Figura 6.8 ilustra as rotas estimadas das viagens realizadas na Hora Pico da Manhã.

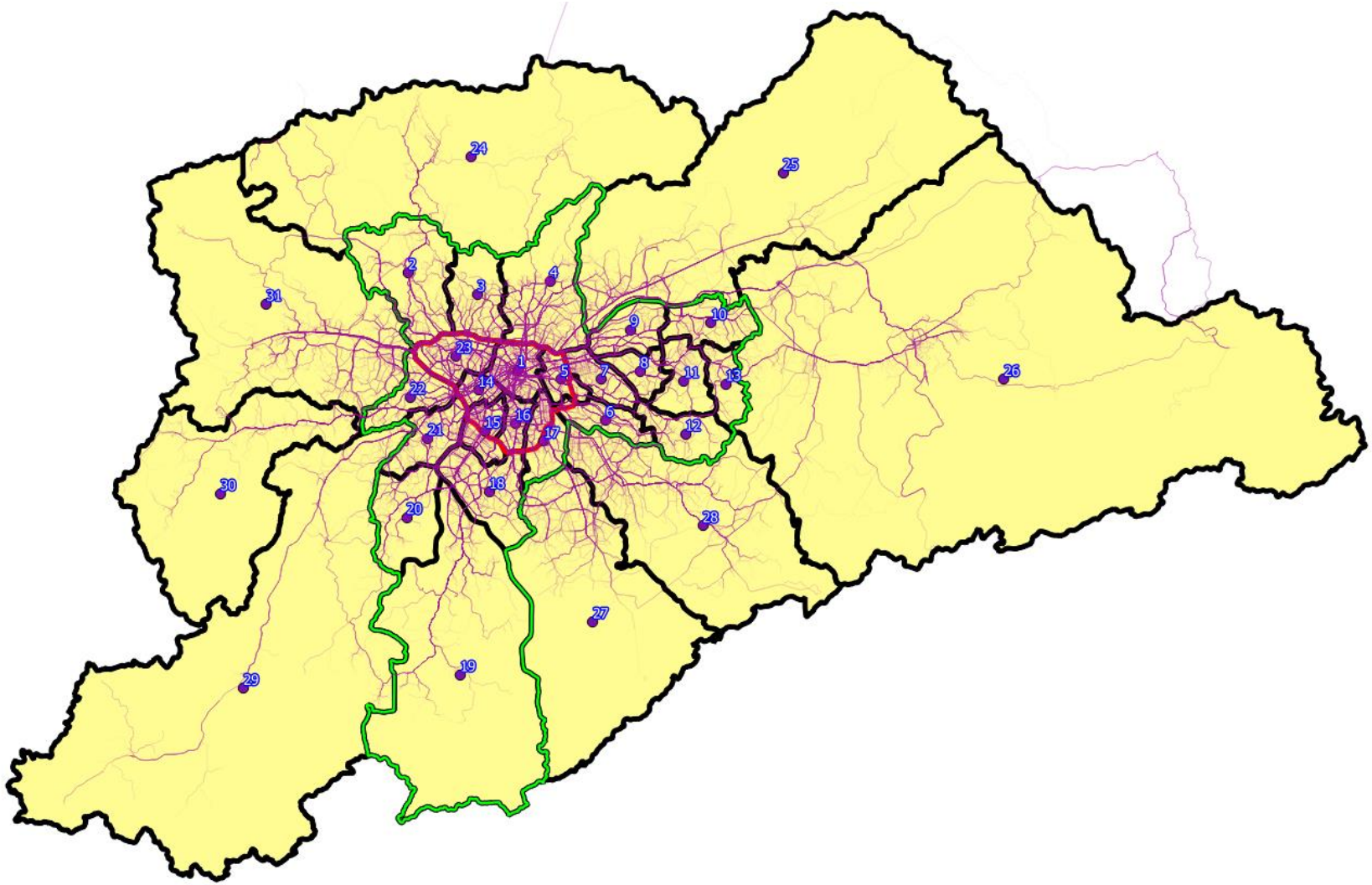
Note que ambos os mapas possuem um grande número de viagens que atravessam o centro, enquanto que as matrizes simplificadas ilustradas anteriormente não deixam esta informação clara o suficiente.

Figura 6.7 Linhas de desejo da Hora Pico da Manhã



Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

Figura 6.8 Representação das rotas da Hora Pico da Manhã



Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

6.1.1.3 Cálculo dos custos do TC

A hipótese tarifária utilizada para o TC baseou-se em dois documentos:

- Uma reportagem do site G1 notícias de novembro de 2006 (G1 Notícias - São Paulo, 2006);
- Uma planilha de tarifas da EMTU emitida em 2014 (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos, 2014).

Com base nesses documentos, foram adotadas as premissas listadas a seguir:

- Todos os usuários do metrô, trem ou ônibus utilizavam o "Bilhete Único", beneficiando-se das tarifas com descontos na integração e da possibilidade de utilizar vários ônibus durante um determinado período de tempo;
- A tarifa dos micro-ônibus e das vans da SPTrans eram iguais às tarifas comuns;
- Por dificuldade de lidar com as informações sobre as tarifas da EMTU, adotou-se apenas uma única tarifa para todo o sistema da EMTU, igual à média de todas as tarifas do sistema;
- Dado que a tabela da EMTU é de 2014, os seus preços foram ajustados para 2007 segundo a média de alguns índices de inflação (índice geral de preços do mercado – IGP-M, índice nacional de preços ao consumidor – INPC, índice de preços ao consumidor-SP – IPC-FIPE, índice preços ao consumidor amplo – IPCA, e índice geral de preços – IGP-DI). O fator de deflação utilizado foi de 0,6671.
- Pela simples falta de informação sobre os sistemas de ônibus (e micro-ônibus e vans) dos outros municípios, adotou-se que as tarifas dos ônibus de todos os outros municípios eram iguais às da SPTrans.

A tarifa do primeiro embarque e as tarifas de integração são apresentadas na Tabela 6.4 e Tabela 6.5.

Tabela 6.4 Tarifas de embarque em 2007

Modo	Tarifa
Ônibus SPTrans	R$ 2.30
Ônibus (outros municípios)	R$ 2.30
Ônibus EMTU (média)	R$ 2.66
Metrô	R$ 2.30
Trem	R$ 2.30

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos, 2014; G1 Notícias - São Paulo, 2006).

Tabela 6.5 Matriz tarifária para integração

		Modo de Destino				
		Ôn. SPTrans	Ôn. EMTU	Ôn. (outros)	Metrô	Trem
Modo de Origem	Ôn. SPTrans	R$ 0.00	R$ 2.66	R$ 2.30	R$ 1.70	R$ 1.70
	Ôn. EMTU	R$ 2.30	R$ 2.66	R$ 2.30	R$ 2.30	R$ 2.30
	Ôn. (outros)	R$ 2.30	R$ 2.66	R$ 2.30	R$ 2.30	R$ 2.30
	Metrô	R$ 1.70	R$ 2.66	R$ 2.30	R$ 0.00	R$ 0.00
	Trem	R$ 1.70	R$ 2.66	R$ 2.30	R$ 0.00	R$ 0.00

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos, 2014; G1 Notícias - São Paulo, 2006).

6.1.1.4 Cálculo dos custos do TI

Para o cálculo dos custos do TI, utilizaram-se a ferramenta de rede GraphHopper e um documento do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) contendo informações sobre os custos de viagens de automóvel (Gomide e Morato, 2011).

A partir do GraphHopper e das coordenadas de origem e destino de cada viagem, estimou-se a rota do TI. O GraphHopper dá diversas informações sobre a rota, tais como o próprio traçado e a distância percorrida.

Vale mencionar que a rota é estimada sem a influência do congestionamento. Ou seja, os caminhos foram escolhidos com base em uma rede "livre".

O documento do IEMA fornece a informação de que uma viagem típica de automóvel com 7 quilômetros de comprimento possui custo fixo de R$ 2,88 e custo variável de R$ 2,31. Os custos fixos estão relacionados à depreciação, manutenção

e tributos. Já os custos variáveis estão relacionados aos custos do combustível e de estacionamento.

Dado que o documento do IEMA é de 2011, aqui também foi necessária a correção dos valores para 2007. Essa correção, assim como aquela feita aos valores da tarifa da EMTU, foi obtida através da média de diversos índices de inflação (índice geral de preços do mercado – IGP-M, índice nacional de preços ao consumidor – INPC, índice de preços ao consumidor-SP – IPC-FIPE, índice preços ao consumidor amplo – IPCA, e índice geral de preços – IGP-DI). O fator de deflação utilizado foi de 0,7861.

Assumiu-se então que todas as viagens de TI teriam custo representado pela equação abaixo:

$$Custo\ TI(d) = \left(2{,}88 + \frac{2{,}31}{7} \cdot d\right) \cdot 0{,}7861\ ,$$

onde:

Custo TI : custo da viagem em questão, em R$
d : distância fornecida pelo GraphHopper em quilômetros

6.1.1.5 Preenchimento de lacunas do banco de dados

Independentemente da forma funcional escolhida para o modelo de escolha discreta, foi necessário calcular as variáveis de custo e tempo das alternativas, pois eram as principais variáveis através das quais se daria a avaliação de um sistema de *congestion charging*. Por exemplo, ao cobrar um *congestion charge* dos usuários do TI, espera-se que haja uma migração do TI para o TC por conta do aumento de custo do TI. No entanto, espera-se também que a redução do número de pessoas utilizando o TI impacte o congestionamento positivamente, fazendo com que as viagens por TI sejam mais rápidas, atraindo pessoas de volta para o TI. Para que se consiga avaliar todas estas nuances, o modelo de escolha discreta desenvolvido deve conseguir responder, portanto, aos custos e aos tempos.

Para utilizar a base de dados da OD 2007 nesta etapa, foram feitas adaptações e inferências para as variáveis desconhecidas. Para ilustrar o problema, é apresentada uma versão simplificada do banco de dados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 Simplificação do banco de dados da OD 2007

ID Viagem	Modo Escolhido	Tempo de Viagem	Submodos TC usados	O-D	Tempo TI	Custo TI	Tempo TC	Custo TC
100001	TI	20		1-2	20			
100002	TI	18		1-2	18			
100003	TC	40	Ônibus	1-2			40	
100004	TC	45	Ônibus + Trem	1-2			45	
100005	TC	50	Trem + Metrô	1-2			50	
100006	TI	50		2-2	50			
100007	TC	30	Metrô	2-2			30	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se notar que o banco não possui todas as informações necessárias para elaborar o modelo de escolha discreta. Por exemplo, a viagem de ID 100001 foi realizada por TI, portanto não se sabe qual seria o tempo da alternativa TC. Deve-se apontar aqui também que a base original não possui dados de custos de nenhum dos modos.

Para suprir estas lacunas, foram realizados os seguintes passos:

- Passo 1: encontraram-se os tempos declarados de cada modo a partir das médias dos pares OD;
- Passo 2: encontraram-se os custos do TI por meio da distância inferida e de custo quilométrico;
- Passo 3: conhecendo os submodos TC utilizados nas viagens TC, encontraram-se os custos do TC utilizando uma hipótese tarifária;
- Passo 4: encontraram-se as médias dos custos TC por pares OD.

Portanto, ao final destes passos, o banco estaria completo, conforme ilustra a Tabela 6.7. Nela estão destacados os passos em que cada lacuna foi preenchida.

Note que o tempo TI das viagens 100003, 100004 e 100005 são iguais à média do tempo TI das viagens 100001 e 100002. Algo semelhante se aplica aos tempos TC das viagens 100001 e 100002, iguais à média dos tempos TC das viagens 100003, 100004 e 100005.

Tabela 6.7 Banco de dados simplificado preenchido

ID Viagem	Modo Escolhido	Tempo de Viagem	Submodos TC usados	O-D	Tempo TI	Custo TI	Tempo TC	Custo TC
100001	TI	20		1-2	20	R$ 5.00	45	R$ 3.55
100002	TI	18		1-2	18	R$ 6.00	45	R$ 3.55
100003	TC	40	Ônibus	1-2	19	R$ 2.50	40	R$ 3.00
100004	TC	45	Ônibus + Trem	1-2	19	R$ 3.50	45	R$ 4.65
100005	TC	50	Trem + Metrô	1-2	19	R$ 7.75	50	R$ 3.00
100006	TI	50		2-2	50	R$ 4.60	30	R$ 3.00
100007	TC	30	Metrô	2-2	50	R$ 2.50	30	R$ 3.00

Legenda
Passo 1
Passo 2
Passo 3
Passo 4

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2 Descrição da base final

Após a aplicação dos filtros e do preenchimento das lacunas do banco de dados, obteve-se uma base de dados passível de ser utilizada na estimação de modelos de escolha discreta.

Nesta seção, são apresentadas algumas informações sobre as variáveis da base de dados resultante.

6.1.2.1 Variáveis utilizadas

A Tabela 6.8 identifica quais as variáveis utilizadas para a estimação dos modelos.

As possíveis categorias das variáveis categóricas são apresentadas na Tabela 6.9.

Tabela 6.8 Relação das variáveis utilizadas

Variável	Unidade de Referência	Tipo de Variável	Nome no banco
Tipo de Domicílio	Domicílio	Categórica	tipo_dom
Total de Moradores na Família	Família	Categórica	no_moraf
Condição de Moradia	Família	Categórica	condmora
Renda Familiar (em R$)	Família	Numérica	renda_fa
Critério de Classificação Econômica Brasil	Família	Categórica	criterio_b
Quantidade de Automóveis	Família	Categórica	qt_auto
Situação Familiar	Pessoa	Categórica	sit_fam
Gênero	Pessoa	Categórica	sexo
Estuda Atualmente?	Pessoa	Categórica	estuda
Tipo de Escola	Pessoa	Categórica	tipo_esc
Grau de Instrução	Pessoa	Categórica	grau_ins
Condição de Atividade	Pessoa	Categórica	cd_ativi
Condição de Renda Individual	Pessoa	Categórica	co_ren_i
Vínculo Empregatício do 1º Trabalho	Pessoa	Categórica	vinc1
Primeiro Trabalho é igual a Residência ?	Pessoa	Categórica	trab1_re
Motivo na Origem	Viagem	Categórica	motivo_o
Motivo no Destino	Viagem	Categórica	motivo_d
Servir Passageiro na Origem	Viagem	Categórica	servir_o
Servir Passageiro no Destino	Viagem	Categórica	servir_d
Custo	Viagem	Numérica	custo
Tempo	Viagem	Numérica	tempo
Modo	Viagem	Categórica	modo
Escolheu o modo em questão?	Viagem	Categórica	escolheu_modo
Custo em relação à renda	Viagem/Família	Numérica	custo_renda
Identificador de Viagem	Viagem	Texto	ID_Viag
Identificador de Pessoa	Viagem	Texto	id_pess
Identificador de Família	Viagem	Texto	id_fam
Identificador de Domicílio	Viagem	Texto	id_dom

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

Tabela 6.9 Categorias das variáveis categóricas

Variável	Possíveis valores assumidos (Vars. Categóricas)
Tipo de Domicílio	1 – Particular
	2 – Coletivo
	3 – Favela
Condição de Moradia	1 - Alugada
	2 - Própria
	3 - Cedida
	4 - Outros
	5 - Não Respondeu
Critério de Classificação Econômica Brasil	1 – A1
	2 – A2
	3 – B1
	4 – B2
	5 – C1
	6 – C2
	7 – D
	8 – E
Situação Familiar	1 – Pessoa Responsável
	2 – Cônjuge/Companheiro(a)
	3 – Filho(a)/Enteado(a)
	4 - Outro Parente
	5 - Agregado
	6 - Empregado Residente
	7 - Parente do Empregado
Gênero	1 - Masculino
	2 - Feminino
Estuda Atualmente?	1 - Não
	2 - Creche/Pré-Escola
	3 - 1º Grau /Fundamental
	4 - 2º Grau/Médio
	6 – Superior/Universitário
	7 - Outros
Tipo de Escola	0 - Não estuda
	1 - Pública
	2 - Particular
Grau de Instrução	1 - Não-Alfabetizado/Primário Incompleto
	2 - Primário Completo/Ginásio Incompleto
	3 - Ginásio Completo/Colegial Incompleto
	4 - Colegial Completo/Superior Incompleto
	5 - Superior Completo
Modo	TC - Transporte Coletivo
	TI - Transporte Individual
Servir Pass. na Origem	1 - Sim
	2 - Não

Variável	Possíveis valores assumidos (Vars. Categóricas)
Condição de Atividade	1 - Tem trabalho
	2 - Faz bico
	3 - Em Licença Médica
	4 - Aposentado/Pensionista
	5 - Sem Trabalho
	6 - Nunca Trabalhou
	7 - Dona de Casa
	8 - Estudante
Condição de Renda Individual	1 - Tem Renda
	2 - Não Tem Renda
	3 - Não Respondeu
Vínculo Empregatício do 1º Trabalho	0 - Não trabalha
	1 - Assalariado com carteira
	2 - Assalariado sem carteira
	3 - Funcionário Público
	4 - Autônomo
	5 - Empregador
	6 - Profissional Liberal
	7 – Dono de Negócio Familiar
	8 - Trabalho Familiar
Primeiro Trabalho é igual à Residência ?	0 - Não trabalha
	1 - Sim
	2 - Não
	3 – Sem endereço fixo
Motivo na Origem	1 - Trabalho/Indústria
	2 - Trabalho/Comércio
	3 - Trabalho/Serviços
	4 - Educação
	5 - Compras
	6 - Saúde
	7 - Lazer
	8 - Residência
	9 – Procurar Emprego
	10 – Assuntos Pessoais
Motivo no Destino	Igual à variável "Motivo na Origem"
Esc. o modo em questão?	0 - Não
	1 - Sim
Servir Pass. no Destino	1 - Sim
	2 - Não

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Companhia do Metropolitano de São Paulo - METRÔ, 2008).

A maioria das variáveis apresentadas possui significado bastante simples e direto. No entanto, vale aqui destacar o significado das variáveis "Modo", "Escolheu o modo em questão?", e "Custo em relação à renda".

Para esta explicação, no entanto, faz-se necessário apresentar uma versão simplificada do banco de dados utilizado, conforme ilustrado na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 Simplificação do banco de dados utilizado

ID_Viag	sexo	modo	custo	tempo	escolheu_modo
1000015	1	TI	3.24	60.00	1
1000015	1	TC	2.34	36.93	0
1000018	1	TI	6.24	36.23	0
1000018	1	TC	2.30	30.00	1
1000028	2	TI	3.56	20.00	1
1000028	2	TC	2.55	38.00	0
1000029	1	TI	3.02	19.00	1
1000029	1	TC	2.30	36.86	0
1000030	2	TI	3.56	20.00	1
1000030	2	TC	2.55	38.00	0
1000044	2	TI	3.56	29.41	0
1000044	2	TC	2.30	30.00	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Note que na Tabela 6.10, as viagens apresentam-se duplicadas (cada ID_Viag aparece duas vezes). Este é o padrão "*long*" de apresentação dos dados para modelos de escolha discreta.

Cada linha deste banco, portanto, representa um tomador de decisão ao se deparar com uma das alternativas disponíveis. A coluna que indica qual é o tomador de decisão é "ID_Viag", e a coluna que identifica a alternativa em questão é "modo". Note, portanto, que a coluna "sexo" apresenta os mesmos valores para os registros repetidos. No entanto, dado que ambas as linhas com o mesmo ID_Viag se referem às alternativas "TI" e "TC", as variáveis "custo" e "tempo" apresentam valores distintos para cada uma das linhas.

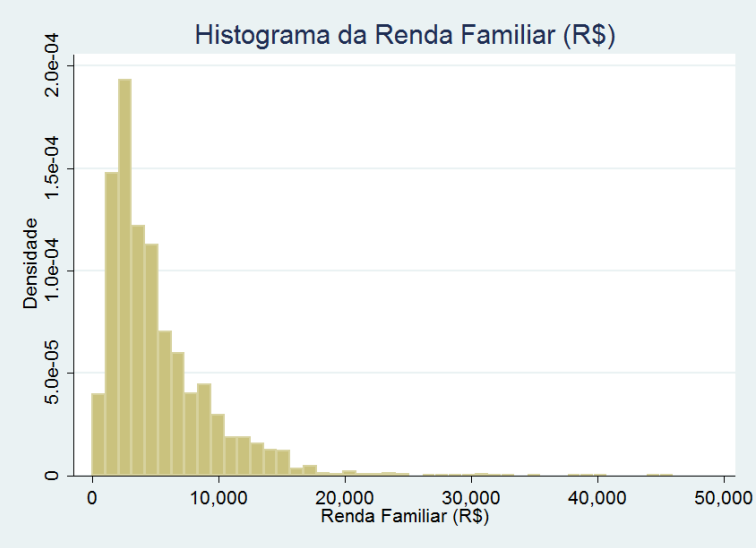
A coluna "escolheu_modo" informa se o tomador de decisão escolheu o modo indicado na coluna "modo".

A variável "Custo em relação à renda" é calculada de forma direta, dividindo o valor da variável "Custo" pela variável "Renda da Família". A variável resultante fornece informação de o quanto o custo da alternativa representa do total da renda da família do tomador de decisão.

6.1.2.2 Renda da amostra

A renda familiar da amostra utilizada para a estimação possui distribuição apresentada na Figura 6.9. A Tabela 6.11 ilustra os dados por modo utilizado.

Figura 6.9 Histograma da variável "Renda Familiar"



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.11 Sumário estatístico da variável "Renda Familiar"

	Média	Des.Pad.	Min	Max
Utiliza TI	R$ 5,777	R$ 4,477	0	R$ 46,000
Utiliza TC	R$ 3,756	R$ 2,729	0	R$ 39,700
Total	R$ 5,184	R$ 4,147	0	R$ 46,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os histogramas das demais variáveis encontram-se no Apêndice B – Descrição dos dados.

6.1.3 Formas funcionais testadas

Para o presente trabalho, foram considerados dois modelos logit de escolha discreta para a avaliação da escolha de modo das pessoas. Os modelos testados possuem as seguintes formas funcionais:

Modelo 1:

$$V_{TC} = \beta_{TC} + \beta_{custo} \cdot custo_{TC} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{TC} + \sum_k \beta_k \cdot s_k$$

$$V_{TI} = \beta_{custo} \cdot custo_{TI} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{TI}$$

Modelo 2:

$$V_{TC} = \beta_{TC} + \beta_{custo_renda} \cdot custo_renda_{TC} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{TC} + \sum_k \beta_k \cdot s_k$$

$$V_{TI} = \beta_{custo_renda} \cdot custo_renda_{TI} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{TI}$$

Onde:

V_{TI} : Utilidade representativa do modo “Transporte Individual”
V_{TC} : Utilidade representativa do modo “Transporte Coletivo”
β_{TC} : Constante do modo “Transporte Coletivo”
β_{custo} : Coeficiente da variável “custo”
β_{tempo} : Coeficiente da variável “tempo”
β_{custo_renda} : Coeficiente da variável “custo_renda”
β_k : Coeficiente da variável socioeconômica k
$custo_{TI}$: Custo da viagem por “Transporte Individual”
$custo_{TC}$: Custo da viagem por “Transporte Coletivo”
$tempo_{TI}$: Tempo da viagem por “Transporte Individual”
$tempo_{TC}$: Tempo da viagem por “Transporte Coletivo”
$custo_renda_{TI}$:Custo da viagem por “Transporte Individual” em relação à renda
$custo_renda_{TC}$:Custo da viagem por “Transporte Coletivo” em relação à renda
s_k : Variável socioeconômica k do tomador de decisão (Ex: renda, sexo, etc.)

6.1.4 Estimação dos modelos

Os modelos foram estimados utilizando *scripts* de comandos do STATA. Foram utilizados como base os *scripts* disponibilizados no curso online da "*Econometrics Academy*" (Katchova, 2013).

A Tabela 6.12 e contém os coeficientes dos modelos após processo iterativo de estimação, onde foram mantidas apenas as variáveis estatisticamente significativas com 95% de confiança.

Vale notar que, em todos os modelos, as variáveis "custo", "tempo" e "custo_renda" possuem sinal negativo conforme esperado, uma vez que o aumento de qualquer uma destas variáveis (*ceteris paribus*) deveria, teoricamente, reduzir a probabilidade da alternativa ser escolhida. Em outras palavras, espera-se que quanto mais caro ou quanto mais demorado seja a alternativa (mantidas as demais condições constantes), menor deve ser a probabilidade do usuário escolhê-la.

É possível notar também que na Tabela 6.12 são apresentados os coeficientes de diversas variáveis com o nome começando em "_I" e terminadas em algum número inteiro. Estas são as *dummies* das variáveis categóricas. Por exemplo, a variável _Isexo_2 indica se a pessoa pertence à categoria 2 da variável "Gênero", o que, de acordo com a Tabela 6.9, significa "Feminino".

Aqui é ilustrado, de forma breve, como interpretar alguns dos resultados da Tabela 6.12. Tomemos o caso da variável _Itipo_dom_3. Sabemos que se trata da *dummy* da categoria 3 da variável "Tipo de Domicílio", variável esta que possui apenas 3 categorias: "particular", "coletivo" e "favela". Para o Modelo 2, o coeficiente de _Itipo_dom_3 é aproximadamente 0,85. Note que não existem, no Modelo 2, os coeficientes das variáveis _Itipo_dom_1 e _Itipo_dom_2. Isso significa que as categorias 1 e 2 da variável "Tipo de Domicílio" são utilizadas como referência. Em termos mais práticos, o coeficiente de _Itipo_dom_3 ser igual a 0,75 indica que a utilidade da alternativa TC para pessoas que moram em domicílios tipo 3 (favela) é 0,75 unidades acima do que pessoas que moram em domicílios tipo 1 e 2 (particular e coletivo, respectivamente). Isso resulta que pessoas que moram em domicílios tipo "favela" têm maior probabilidade de utilizar a alternativa TC do que pessoas que moram em domicílios dos tipos "particular" ou "coletivo". Esta, portanto, é a forma de se interpretar os coeficientes das *dummies* categóricas do modelo

Tabela 6.12 Coeficientes dos modelos 1 e 2

Variável	Modelo 1			Modelo 2		
	Coef	*z*	*P>|z|*	*Coef*	*z*	*P>|z|*
_cons	-6.22179	-22.97	0	-8.0313	-24.73	0
custo	-0.16067	-7.5	0			
tempo	-0.0049	-5.41	0	-0.00585	-6.43	0
custo_renda				-84.5914	-2.74	0.006
renda_fa	-9E-05	-9.21	0			
_Itipo_dom_3				0.857729	2.17	0.03
_Ino_moraf_2	0.691234	4.25	0	0.773493	4.49	0
_Ino_moraf_3	0.966612	6.04	0	1.062944	6.26	0
_Ino_moraf_4	1.020595	6.37	0	1.109178	6.51	0
_Ino_moraf_5	1.199078	7.22	0	1.294825	7.36	0
_Ino_moraf_6	1.243445	6.65	0	1.320852	6.74	0
_Ino_moraf_7	1.026505	4.53	0	1.051384	4.49	0
_Ino_moraf_8	1.123903	3.22	0.001	1.191298	3.41	0.001
_Ino_moraf_9	1.309669	2.56	0.01	1.500334	2.96	0.003
_Ino_moraf_10				4.663293	3.9	0
_Icondmora_5	-0.88674	-3.83	0	-0.86105	-3.66	0
_Icriterio__2				0.42913	2.53	0.011
_Icriterio__3				1.063411	6.17	0
_Icriterio__4				1.298773	7.32	0
_Icriterio__5				1.432177	7.65	0
_Icriterio__6				0.555317	2.47	0.013
_Icriterio__7				-1.86385	-2.69	0.007
_Isit_fam_2	0.373243	4.85	0	0.340838	4.41	0
_Isit_fam_3	0.903007	12.65	0	0.883509	12.21	0
_Isit_fam_4	0.930692	8.33	0	0.884857	7.82	0
_Isit_fam_5	1.147063	4.19	0	1.148326	4.18	0
_Isit_fam_6	2.801372	3.83	0	2.911863	4.1	0
_Isit_fam_7	4.095312	4.8	0	4.180681	4.9	0
_Isexo_2	0.355608	6.68	0	0.342634	6.4	0
_Iestuda_2	-2.14622	-9.48	0	-2.19179	-9.63	0
_Iestuda_3	-2.22722	-13.91	0	-2.30329	-14.15	0
_Iestuda_4	-0.48282	-3.16	0.002	-0.5106	-3.31	0.001
_Iestuda_5	0.334329	3.62	0	0.367737	3.95	0
_Iestuda_6	0.364078	2.76	0.006	0.384168	2.89	0.004
_Igrau_ins_2	0.554612	5.64	0	0.606004	5.93	0
_Igrau_ins_3	0.371446	3.64	0	0.373044	3.6	0
_Igrau_ins_4	0.576184	8.71	0	0.547286	8.15	0
_Icd_ativi_2				0.38495	2.06	0.039
_Ico_ren_i_3	-0.22935	-4.29	0	-0.2265	-4.22	0
_Imotivo_o_8	0.276398	2.28	0.023			
_Imotivo_d_3	0.375169	6.08	0	0.40247	6.62	0
_Imotivo_d_4	0.273294	2.66	0.008	0.28474	2.76	0.006
_Imotivo_d_6	0.603142	3.84	0	0.690559	4.35	0
_Imotivo_d_9	2.746331	3.54	0	2.615118	3.33	0.001
_Iservir_o_2	1.908066	10.47	0	2.250047	14.69	0
_Iservir_d_2	2.324108	16.56	0	2.383721	16.77	0
_Itipo_esc_1	0.556996	5.72	0	0.592564	6.02	0
_Ivinc1_1	0.53423	7.57	0	0.519043	7.29	0
_Ivinc1_2	0.380207	3.66	0	0.39894	3.79	0
_Ivinc1_4	-0.22158	-2.27	0.023	-0.25584	-2.56	0.01
_Ivinc1_5	-1.34062	-4.7	0	-1.38625	-4.85	0
_Ivinc1_7	-2.21707	-5.2	0	-2.32943	-5.45	0
_Ivinc1_8	-1.98582	-4.43	0	-2.11151	-4.68	0
_Iqt_auto_2	-0.89243	-14.29	0	-0.83178	-12.58	0
_Iqt_auto_3	-1.40499	-11.74	0	-1.26139	-10.13	0
_Iqt_auto_4	-1.69532	-6.96	0	-1.53874	-6.3	0
_Iqt_auto_5	-2.61055	-3.48	0.001	-2.47777	-3.3	0.001

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6.12 aponta diversas características interessantes. Segue uma lista (não exaustiva) de constatações que podem ser feitas a partir desses resultados:

- Pessoas que moram em domicílios do tipo "favela" deverão ter uma maior probabilidade de escolher TC em relação às pessoas que moram em domicílios do tipo "Particular" e "Coletivo";
- Quanto maior o número de pessoas na família, maior a probabilidade das pessoas escolherem o TC;
- No modelo 1, as *dummies* da "Classificação Econômica Brasil" tornam-se irrelevantes, muito provavelmente por conta da existência da própria variável "renda_fa". Já no modelo 2, uma vez que a renda está embutida na variável custo_renda, essas *dummies* se tornam estatisticamente significativas;
- O "responsável pela família" geralmente tem maior probabilidade de escolher TI do que todos os outros membros da casa;
- Em ambos os modelos, mulheres apresentam ter maior probabilidade de utilizar o TC;
- Em ambos os modelos, estudantes de escolas públicas têm maior probabilidade de escolher TC em relação a pessoas que não estudam e àquelas que estudam em escola particular;
- Alguns motivos do destino de viagem apresentam influência positiva na probabilidade de escolha de TC, entre eles: Trabalho/Serviços, Educação, Saúde e Procurar Empregos. Pessoas que realizam viagens com esses motivos nos destinos apresentam uma maior probabilidade de escolher o TC (em relação às pessoas que viajaram com qualquer outro propósito no fim de suas viagens);
- A quantidade de automóveis também apresentou uma influência razoável na escolha, alinhada com o esperado: quanto mais automóveis a família possui, menor a probabilidade da pessoa escolher o TC.

Apesar das constatações acima parecerem bastante simplórias e bastante previsíveis, elas nos mostram que o modelo responde, de fato, de forma semelhante à realidade: pessoas em famílias com mais automóveis e maior renda tendem a escolher o TI enquanto que pessoas de famílias mais pobres, moradores de favelas e estudantes de escola pública tendem a escolher o TC.

As estatísticas de ajuste dos modelos encontram-se na Tabela 6.13.

Para avaliar se o modelo proposto é, de fato, diferente do modelo nulo (modelo que só contém a constante), foi realizado o teste Wald. Pode-se ver na Tabela 6.13.que todos os modelos passaram no teste com 95% de confiança.

Outro parâmetro para avaliação dos modelos é o ρ^2, também conhecido como R^2 de McFadden. Para a comparação dos modelos, apresenta-se também o cálculo de ρ^2 ajustado. Apesar de possuir algumas semelhanças ao R^2 de regressões lineares (ambos limitados entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1, melhor o modelo), eles não possuem, de fato, o mesmo significado. O R^2 de regressões lineares indica o quanto da variância da variável dependente consegue ser explicada pelas variáveis explicativas. Já o ρ^2 de modelos de escolha discreta nos informa o quanto o modelo melhorou quando comparado ao modelo nulo (qualidades essas medidas a partir das verossimilhanças). Note que não há relação com variância de variáveis explicadas e explicativas. Devemos lembrar que variáveis categóricas não possuem variância.

Dado que ambos os modelos se comportam de forma bastante semelhante e apresentarem resultados satisfatórios, pode-se escolher qualquer um dos modelos para realizar a avaliação do sistema de *congestion charging*. Escolheu-se o Modelo 1 para esta etapa seguinte por conta de seu tamanho reduzido (menos coeficientes) e pela familiaridade do próprio autor na utilização de modelos onde as variáveis custo e renda são tratadas de forma independente.

Para fins de verificação do modelo escolhido, foram avaliadas as influências de cada termo nas utilidades representativas de cada alternativa. Para tal, foram calculadas as diversas frações das utilidades representativas de ambas as alternativas. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.14.

É interessante notar que os fatores socioeconômicos aparentam fazer um balanço razoável com a constante. Conforme esperado, nota-se que a influência média do tempo para o TC é o dobro daquela para o TI, uma vez que o TC apresenta um tempo aproximadamente duas vezes superior ao TI, em média.

Tabela 6.13 Resultados globais dos modelos

	Modelo 1	Modelo 2
LL	-5468.13	-5404.28
LL Nulo	-7652.5	-7652.5
ρ^2	0.285445	0.293789
ρ^2 ajust	0.270547	0.280591
Wald Chi^2	2443.92	2446.77
Prob > Chi^2	0	0
Modelado TI - Real TI	7886	7885
Modelado TI - Real TC	1628	1594
Modelado TC - Real TI	1046	1047
Modelado TC - Real TC	2083	2117
Real TI	8932	8932
Real TC	3711	3711
Modelado TI	9514	9479
Modelado TC	3129	3164
Acertos	9969	10002
Erros	2674	2641
Acertos (%)	78.8%	79.1%
Erros (%)	21.2%	20.9%
Valor do Tempo (R$/h)	1.83115	
% TC Real	29.4%	29.4%
% TC Modelado	24.7%	25.0%
% TI Real	70.6%	70.6%
% TI Modelado	75.3%	75.0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6.14 Valores médios de custo e tempo e influência média na utilidade representativa

Alternativa	Valores Médios		Influência média na utilidade representativa				
	Custo	Tempo	Contante	Dummies Socioeconômicas	Renda Familiar	Custo	Tempo
TC	2.67	58.86	-6.22	5.55	-0.47	-0.43	-0.29
TI	1.33	31.30	0.00	0.00	0.00	-0.21	-0.15

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.5 Introdução de sistema de *congestion charging*

Nesta seção foi feita a avaliação da introdução de um sistema de *congestion charging* de um sistema de zonas com a mesma abrangência do atual sistema de rodízio.

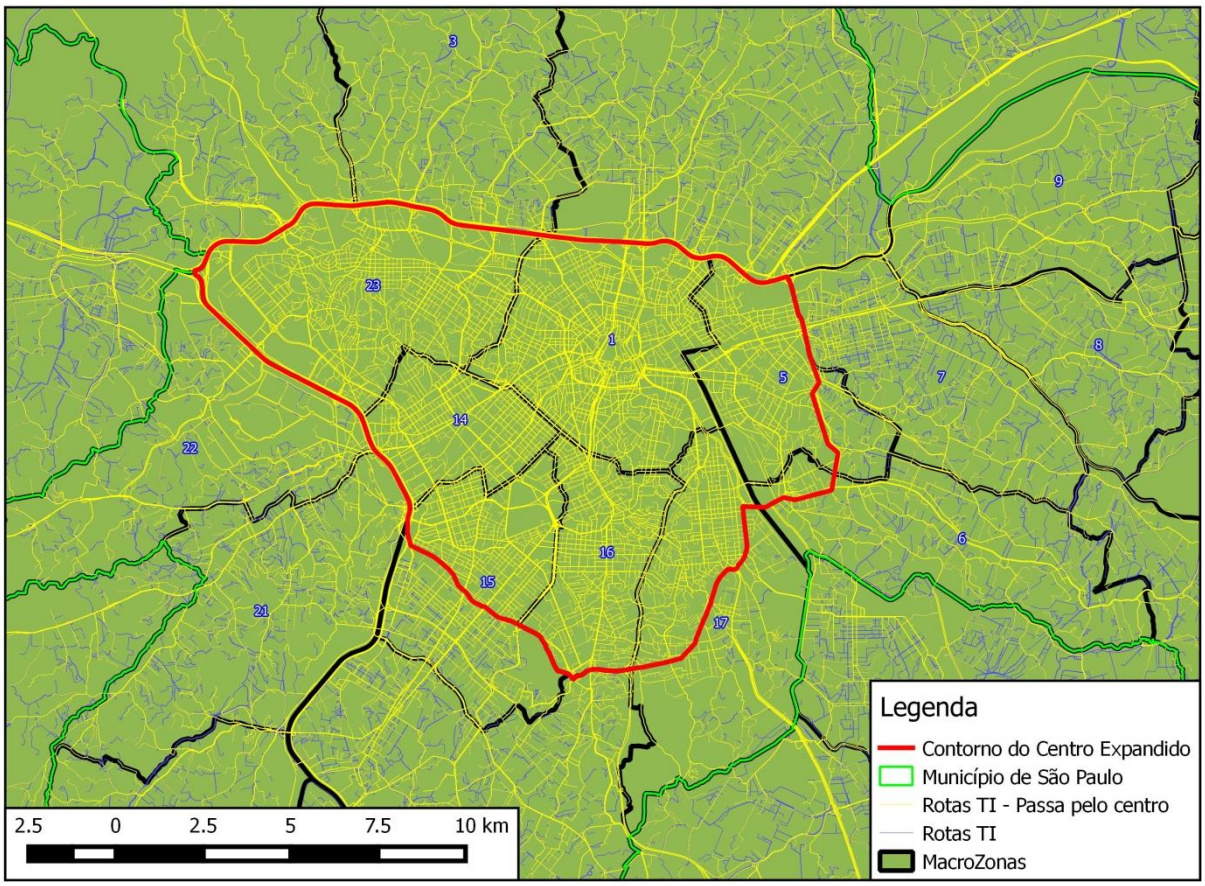
Para identificar as viagens passíveis de um *congestion charge*, marcaram-se as viagens que, quando realizadas pelo TI, passariam pelo centro expandido. Esta etapa foi realizada cruzando os caminhos inferidos pelo GraphHopper com o arquivo geográfico oficial da CET contendo os limites da área de rodízio. A Figura 6.10 ilustra as viagens passíveis do *congestion charge*.

Identificadas as viagens passíveis do *congestion charge*, a introdução do sistema de *congestion charging* foi modelada a partir de um aumento do campo “Custo TI” das viagens que utilizam o centro. Foram avaliados *congestion charges* de até R$50,00 em incrementos de R$0,50. Os gráficos aqui apresentados, porém, mostram apenas *congestion charges* de até R$10,00 ou R$30,00. Já as versões interativas dos gráficos apresentam todo o espectro entre R0,00 e R$50,00.

A alteração somente do campo do “Custo TI” não seria o suficiente para uma real e justa avaliação do sistema, dado que os tempos de viagem também deverão ser alterados. Portanto, para a avaliação das mudanças dos tempos de viagem, foram criados nove cenários, onde os tempos de viagem do TC e do TI sofreram alterações de -25%, 0% e +25%. Vale notar aqui que foram avaliadas alterações nos tempos de viagem apenas das viagens passíveis do *congestion charge*.

Ressalta-se aqui que foi avaliado um sistema de *congestion charging* que opere apenas durante a hora pico da manhã (entre 6h40 e 7h40) de dias úteis.

Figura 6.10 Viagens que passam pelo centro expandido



Fonte: Elaborado pelo autor.

O presente autor utilizou 25% de alteração nos tempos de viagem em uma tentativa de ilustrar uma vasta gama de possibilidades. Por exemplo, o cenário onde o tempo do TI reduz 25% e o do TC aumenta 25% pode ser consequência da superlotação do sistema TC. Já o cenário onde o tempo do TC reduz 25% e o do TI aumenta 25% pode ilustrar uma situação onde, além do *congestion charge*, haja outras políticas que reduzam as velocidades do TI e aumentem as velocidades do TC, como a implantação de corredores de ônibus.

A partir dos novos custos do TI e dos novos tempos de ambos os modos, o modelo de escolha discreta foi utilizado para avaliar os volumes de viagens por TI e por TC.

Para avaliar o volume de viagens TI deslocadas para o TC, utilizou-se como base a situação atual resultante do modelo. Por exemplo, suponha que na situação atual sem *congestion charge* e sem alterações nos tempos de viagem, o modelo de escolha discreta aponte que haja 2 milhões de viagens por TI e 3 milhões de viagens

por TC. Suponha também que, com um *congestion charge* de R$5,00 e com uma redução de tempo de 25% para o TI e um aumento de 25% de tempo para o TC, o modelo de escolha discreta aponte que haja 1 milhão de viagens por TI e 4 milhões de viagens por TC. Nesta situação, considerou-se que 1 milhão de passageiros do TI foram deslocados para o TC.

As estimativas foram feitas por *sample enumeration* (Train, 2009) (Ben-Akiva e Lerman, 1985). O processo é ilustrado a seguir: suponha que um registro do banco de dados possua um fator de expansão de viagem FE_Via igual a 100. Suponha também que, para este registro, as probabilidades resultantes do modelo de escolha discreta para cada alternativa foram 85% para o TI e 15% para o TC. Nesta situação, com o método de *sample enumeration,* infere-se que foram realizadas 85 viagens por TI e 15 viagens por TC.

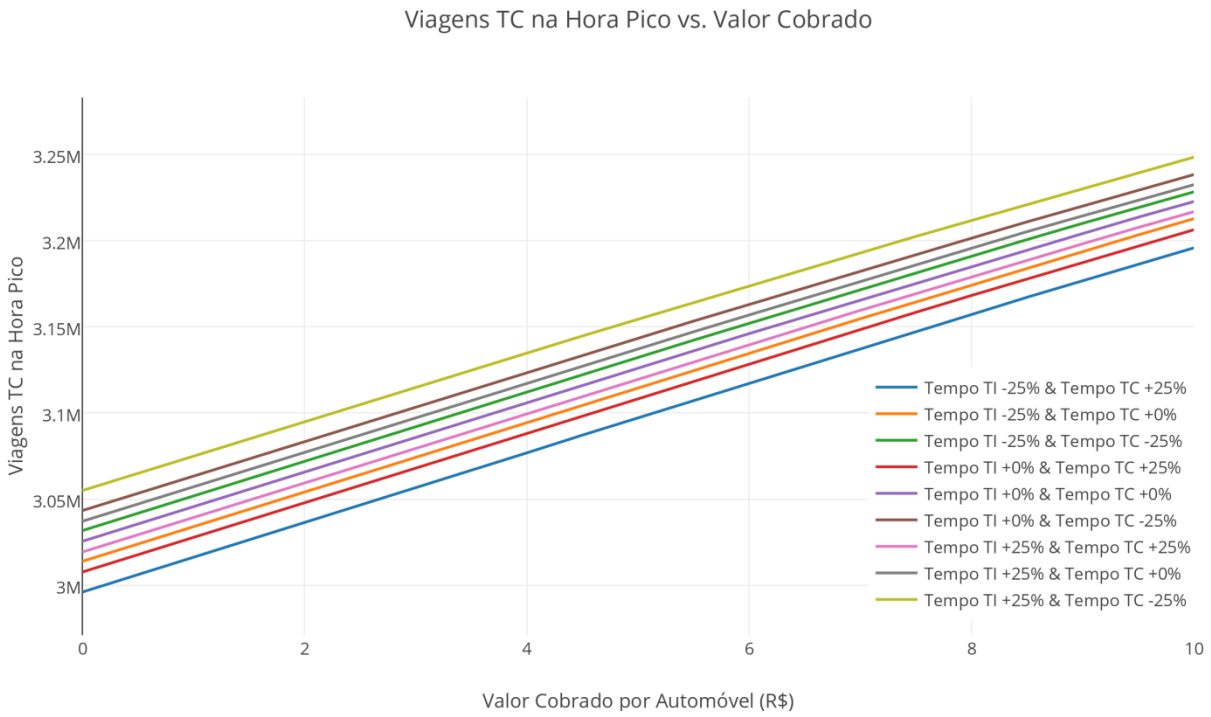
Para o cálculo final dos totais de viagem e divisão modal, foram incluídas as viagens que não utilizam o centro expandido. Foram incluídas também viagens feitas pelos modos "Fretado" e "Escolar" e viagens TC de pessoas que não possuem automóvel. De forma resumida, foram adicionadas novamente todas as viagens que haviam sido removidas pelos Filtros 4 e 5 da seção 6.1.1.1.

Todas as projeções foram realizadas com *scripts* desenvolvidos pelo presente autor em linguagem de programação Python. Os resultados das projeções estão apresentados abaixo, bem como em uma plataforma online interativa chamada "Plotly". Os *links* para as versões interativas estão indicados em cada um dos gráficos.

A Figura 6.11 e a Figura 6.12 ilustram, respectivamente, os totais de viagens por TC e por TI. As divisões modais por TC e TI estão ilustradas na Figura 6.13 e na Figura 6.14, respectivamente. Por fim, a Figura 6.15 e Figura 6.16 ilustram, respectivamente, o volume de passageiros deslocados do TI e a arrecadação estimada para a hora pico.

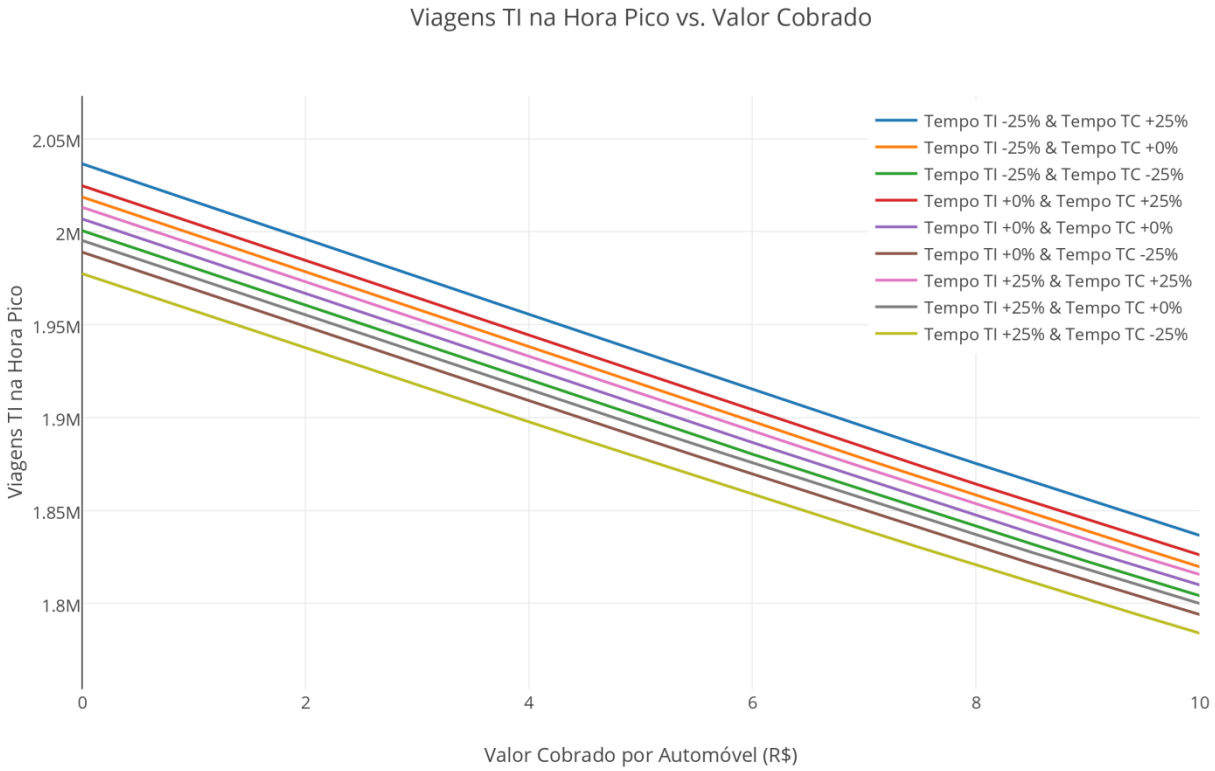
Vale destacar que todos os valores monetários apresentados nos gráficos a seguir estão em R$ de 2007. Deve ser destacado também que foi adotada uma ocupação média de 1,52 pessoas por automóvel, ocupação essa resultante do banco de dados utilizado na fase de estimação dos modelos.

Figura 6.11 Viagens TC em função do valor cobrado



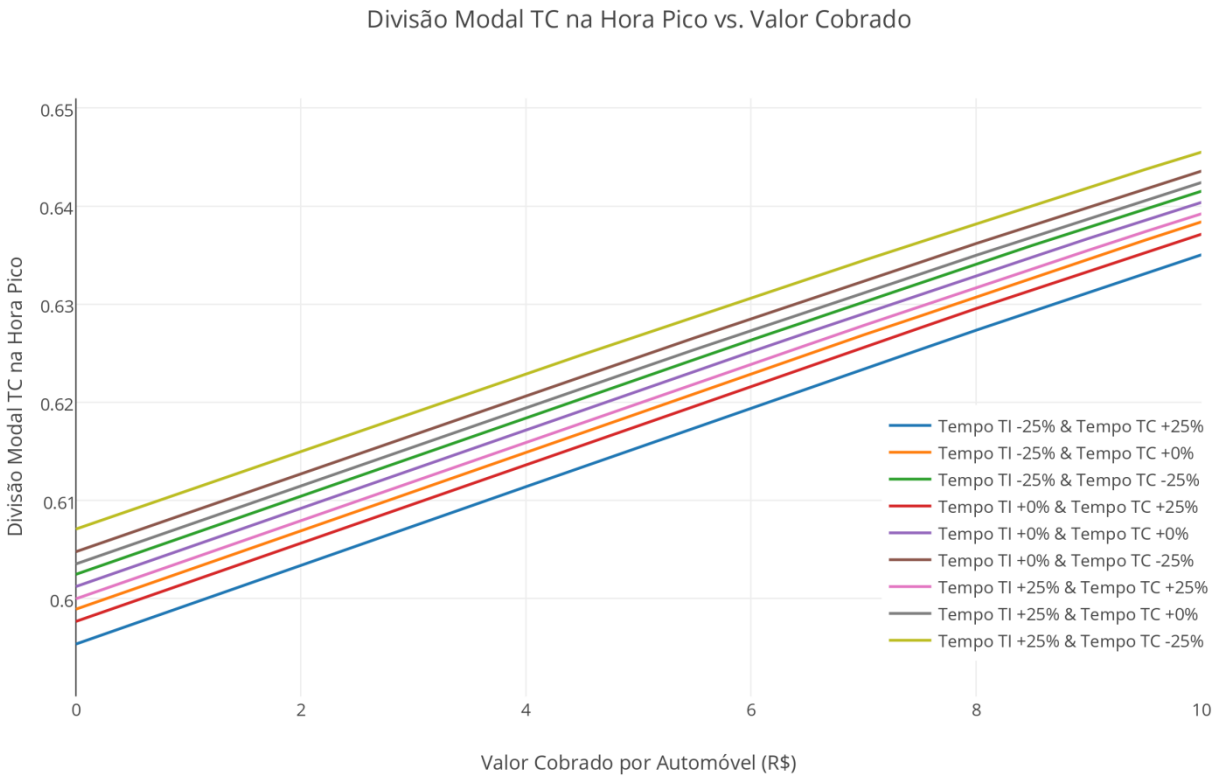
Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/385

Figura 6.12 Viagens TI em função do valor cobrado



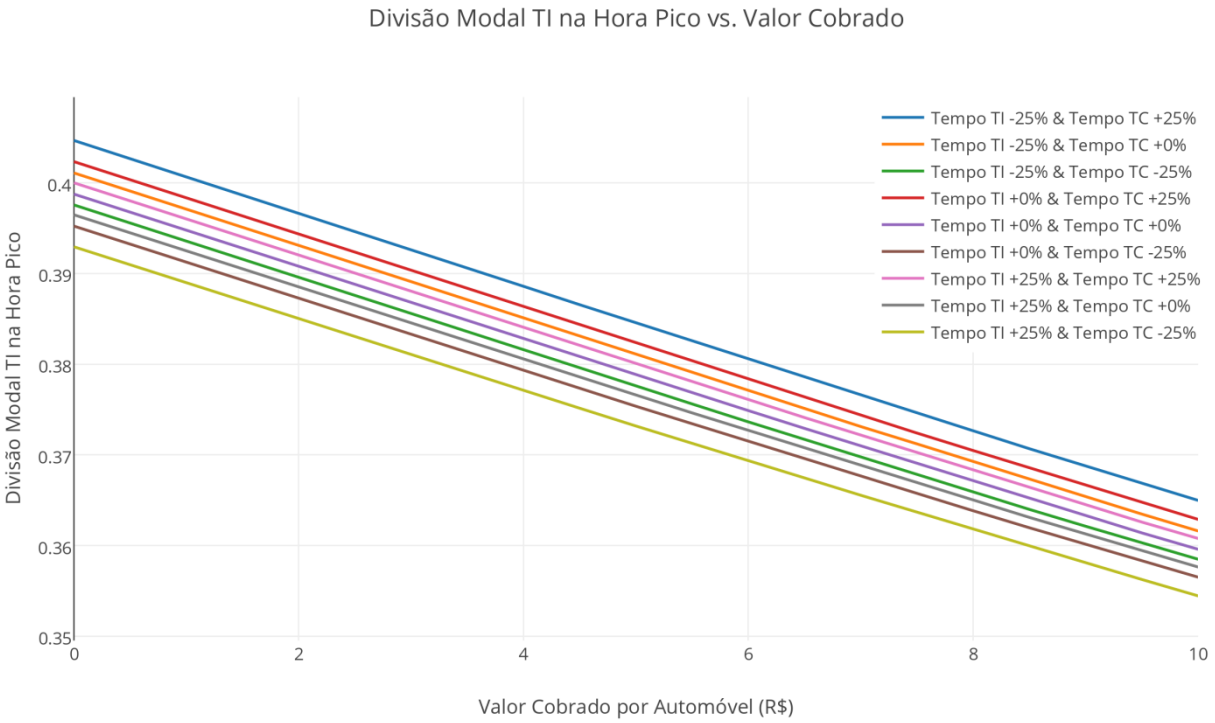
Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/377

Figura 6.13 Divisão modal TC em função do valor cobrado



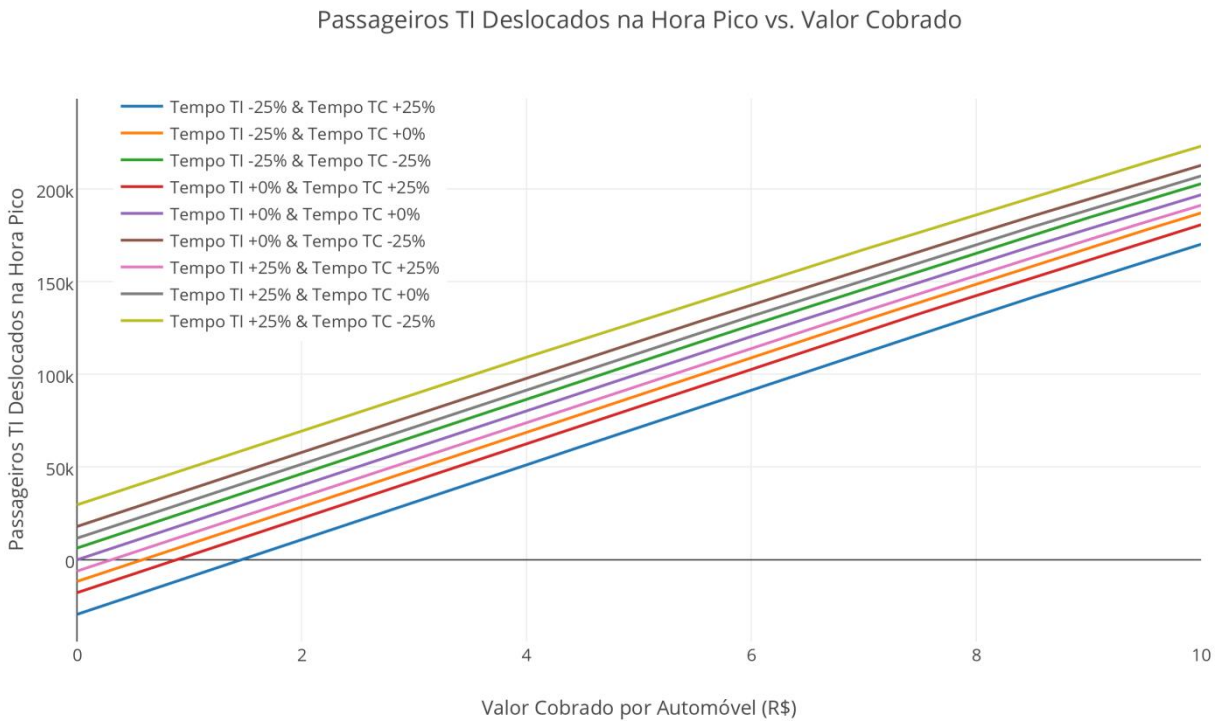
Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/366

Figura 6.14 Divisão modal TI em função do valor cobrado



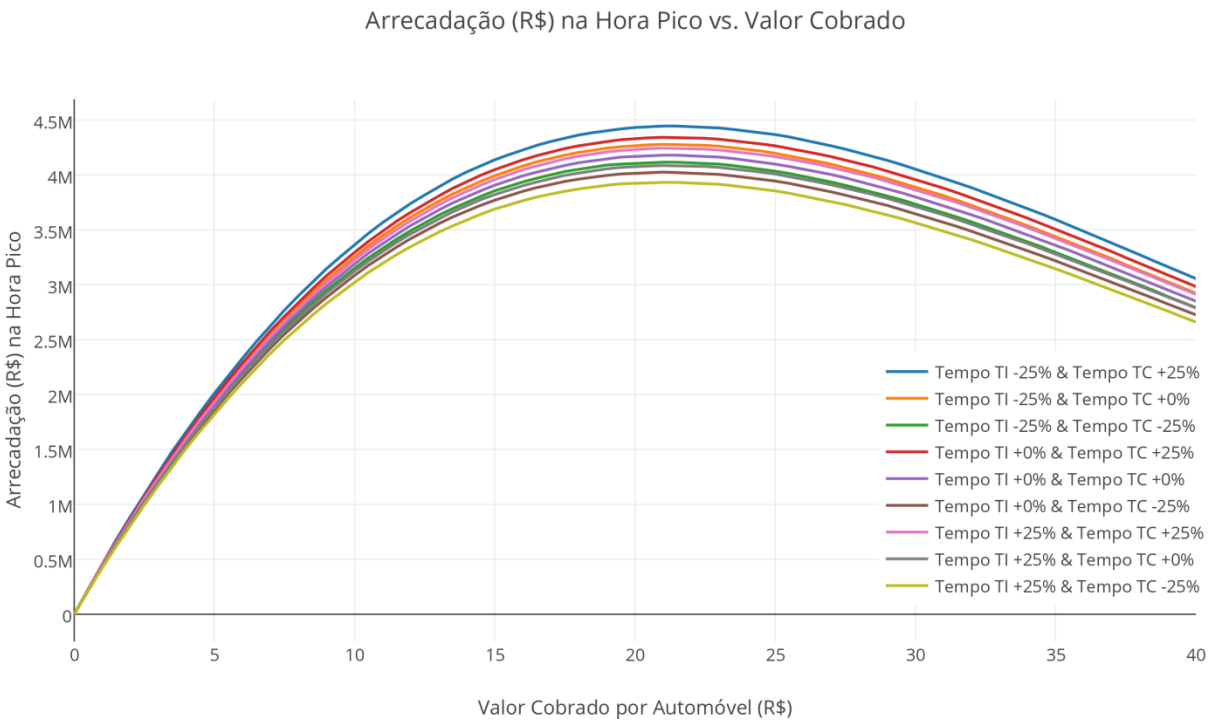
Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/388

Figura 6.15 Passageiros TI deslocados em função do valor cobrado



Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/381

Figura 6.16 Arrecadação (R$) em função do valor cobrado



Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: http://plot.ly/~phildias/383

A partir dos gráficos apresentados, pode-se verificar que um *congestion charge* de R$2,50 promove uma alteração na divisão modal de até 1,7 pontos percentuais a favor do TC, mostrando o potencial de deslocar entre 20 e 80 mil passageiros do TI para o TC, gerando uma receita aproximada de R$ 1 milhão na hora pico. Supondo que um sistema desses opere apenas na hora pico de dias úteis, seriam arrecadados aproximadamente R$ 250 milhões por ano.

Verifica-se também que um *congestion charge* de R$10,00 promove uma alteração na divisão modal de cerca de 4 percentuais a favor do TC em todos os cenários, mostrando o potencial de deslocar entre 170 e 220 mil passageiros do TI para o TC e gerar uma receita aproximada de R$ 3 milhões na hora pico. Novamente, supondo a operação do sistema apenas nas horas de pico de dias úteis, a arrecadação anual seria de aproximadamente R$ 750 milhões.

Os gráficos nos fornecem também a informação de que valor máximo de arrecadação do sistema de *congestion charging* para a hora pico (entre R$ 4,0 milhões e R$ 4,4 milhões) é atingida com a aplicação de um *congestion charge* de R$20,00. A anualização deste valor de forma análoga aos valores já mencionados (operação do sistema de *congestion charging* somente nas horas de pico dos dias úteis) resulta em uma arrecadação anual de aproximadamente R$ 1 bilhão.

6.1.6 Comentários e limitações das projeções

As projeções apresentadas na seção 6.1.5 possuem uma série de limitações, entre elas, o fato de o modelo não contemplar a possibilidade de supressão da viagem. Isso pode levar a superestimações dos valores arrecadados e distorção dos totais de viagem por TI e TC, distorcendo, consequentemente, a divisão modal.

Outro ponto que merece atenção é que o modelo pressupõe a existência da alternativa "Transporte Coletivo" para todos os tomadores de decisão, o que pode não ser verdade. De forma análoga, a alternativa "TI" pode não ser uma real alternativa disponível para os tomadores de decisão, apesar do autor ter filtrado os dados em uma tentativa de diminuir estes erros.

Além disso, não podemos descartar as suposições que foram feitas para os custos das alternativas.

Também é de crucial importância ressaltar que os modelos de escolha discreta gerados no presente trabalho foram estimados a partir da base de dados da OD 2007, ou seja, uma base de dados originalmente concebida com outros propósitos que não suprir as necessidades da modelagem de escolha discreta.

Portanto, o modelo e as projeções aqui apresentados, devem ser usados como guias referenciais, não como verdades absolutas.

6.2 Estudo de capacidade do sistema de Transporte Coletivo

6.2.1 Dados disponíveis

Os dados disponibilizados para o autor foram:

- Traçados das linhas da SPTrans, METRÔ e CPTM – GTFS (*General Transit Feed Specification*)
- Dados de GPS dos ônibus da SPTrans – AVL (*Automated Vehicle Location*)
- Localização das catracas do METRÔ, da CPTM e dos terminais da SPTrans
- Dados de bilhetagem da SPTrans, METRÔ e CPTM – AFC (*Automated Fare Collection*)

O autor possui três meses dos referidos dados: junho, julho e agosto de 2013.

Devem ser destacados alguns problemas com os dados disponíveis:

- Apesar de pertencer à RMSP, não foi possível obter informações da EMTU, como traçado de linhas, GPS de ônibus e bilhetagem;
- Os dados de bilhetagem possuem informação de embarque, mas não de desembarque;
- A bilhetagem no ônibus não é necessariamente realizada no mesmo instante do embarque;
- Dado que o usuário não utiliza o "Bilhete Único" dentro do sistema de trilhos (METRÔ e CPTM) para fazer transferências entre linhas, não se consegue ter certeza da rota que o usuário utilizou dentro do sistema de trilhos;
- Não há informações sobre a localização dos veículos do METRÔ nem da CPTM, como na base AVL dos ônibus da SPTrans;

As bases de dados de AVL e de AFC estão divididas em conjuntos diários. Cada conjunto diário do AVL possui cerca de 15 milhões de registros de localização, totalizando cerca de 1 gigabyte. Os conjuntos diários do AFC possuem cerca de 13,5 milhões de registros de bilhetagem, totalizando aproximadamente 800 megabytes. Estes são os seus tamanhos quando dispostos em arquivos descompactados.

Dada a magnitude do volume de dados, o presente autor desenvolveu *scripts* em Python para facilitar o seu manuseio.

Os *scripts* desenvolvidos encontram-se detalhados na seção 6.2.4.

6.2.2 Descrição dos dados

Nesta seção serão detalhadas as bases de GTFS, AVL e AFC.

6.2.2.1 Oferta – GTFS

A base GTFS disponibilizada pela SPTrans contém informações sobre as linhas como:

- Número da linha (Ex: 847P-10)
- Nome da linha (Ex: Terminal Pirituba - Itaim Bibi);
- Traçado de ida e de volta das linhas (coordenadas Lat-Lon);
- Base de pontos de ônibus da SPTrans (coordenadas Lat-Lon);
- Sequência de parada nos pontos de ônibus de cada linha;
- Frequência programada de partidas para cada linha, hora a hora;

6.2.2.2 GPS dos ônibus – AVL

A base de dados de AVL possui informações sobre localização de todos os veículos do sistema da SPTrans com intervalos de aproximadamente 30 segundos. Além da localização, a base possui também informações cadastrais sobre a linha e o sentido em que o veículo está operando.

6.2.2.3 Bilhetagem – AFC

A base de dados de AFC informa o horário e em qual catraca foi realizada a bilhetagem. A base também informa a relação entre catracas e veículos. Além disso, a base possui informação sobre a linha e o sentido em que ocorreu a bilhetagem.

Vale notar aqui que o principal aspecto desta base é a possibilidade de identificar embarques seguidos realizados pelo mesmo "Bilhete Único". As bases de bilhetagem possuem um campo com um identificador de cartão de "Bilhetes Único". Deste campo, é impossível extrair informação do dono do cartão (como nome, idade, sexo, renda, etc), mas é sim possível identificar a sequência de embarques que a mesma pessoa faz.

No caso da pessoa realizar o pagamento em dinheiro, no entanto, o embarque é registrado sob o "Bilhete Único" do cobrador. Ao avaliar os dados dos ônibus, cada veículo geralmente possui um "Bilhete Único" que realiza um número muito elevado de "catracadas". Desta forma, torna-se possível identificar o cobrador.

6.2.2.4 Inconsistências dos dados

Além dos problemas já citados, podem ser elencadas algumas inconsistências nas bases de AVL e AFC:

- Sinal de GPS de ônibus nas coordenadas (0,0), (-90, -180) ou em pontos fora da RMSP;
- Registro de GPS ou bilhetagem em veículos que não possuem linha cadastrada;
- Veículos andando fora das linhas nas quais estão cadastrados;
- Idas e voltas com cadastro errado;
- Dificuldade de identificar reais horas de início e fim de viagens;
- Dados do AVL ou do AFC com o sentido invertido no meio da viagem;
- Sinais de GPS que parecem "voltar" no meio da rota.

O problema de sinais de GPS em locais absurdos é relativamente fácil de tratar. No entanto, os outros problemas listados são de enorme dificuldade, dada a natureza conflitante das informações. Dependendo do caso, torna-se quase impossível de

distinguir qual informação está correta de forma automática. Em situações como esta, os dados devem ser avaliados caso a caso.

6.2.3 Avaliação de capacidade para uma viagem da linha 847P-10

Por conta das dificuldades já mencionadas, optou-se tratar de um caso localizado, avaliando apenas uma viagem de um veículo em um único dia. Para tal, foi escolhida uma linha com a qual o próprio autor tivesse alguma familiaridade e que tivesse relevância para o presente estudo. Foi escolhida a linha 847P-10, Terminal Pirituba – Itaim Bibi, pois, além de o autor usá-la com frequência, é uma linha que atravessa a fronteira do centro expandido. Na Figura 6.17 apresenta-se uma ilustração do traçado da linha referida.

A análise feita refere-se à primeira viagem da quarta-feira, dia 21 de agosto de 2013, realizada pelo veículo com cadastro 11352. A viagem tem início às 06:49:43 e término às 09:41:31, totalizando 2 horas, 51 minutos e 45 segundos de viagem. A referida viagem tem um percurso total aproximado de 18 quilômetros, o que resulta em uma velocidade média aproximada de 6,3 km/h.

A informação de início e fim de viagem foi extraída manualmente pelo próprio autor.

A avaliação da capacidade deste veículo nesta viagem foi realizada nas seguintes etapas:

- Filtro dos dados de AVL do veículo 11352;
- Identificação do início e fim da primeira viagem;
- Remoção de dados AVL inconsistentes ("voltam" no meio da viagem);
- Busca de registros de bilhetagem na base de AFC que utilizaram o veículo 11352 dentro do horário da viagem;
- Inferência do local de embarque através do horário da bilhetagem e localização do veículo 11352;
- Inferência do local de desembarque através do local da próxima bilhetagem;
- Associação dos locais de embarque e desembarque de cada passageiro com os pontos do traçado da linha;

- Eliminação de informação contraditória ou incompleta (usuários que aparentam desembarcar em um ponto anterior ao ponto de embarque; e usuários para os quais não foi possível inferir o local de desembarque);
- Expansão dos dados restantes para representarem o total de embarques observados;
- Elaboração de tabela "sobe e desce" com os pontos do traçado da linha;
- Avaliação do carregamento através da tabela "sobe e desce";
- Avaliação do vaga*km utilizando o carregamento da linha e a capacidade do veículo.

Figura 6.17 Mapa da linha 847P-10 – Terminal Pirituba – Itaim Bibi

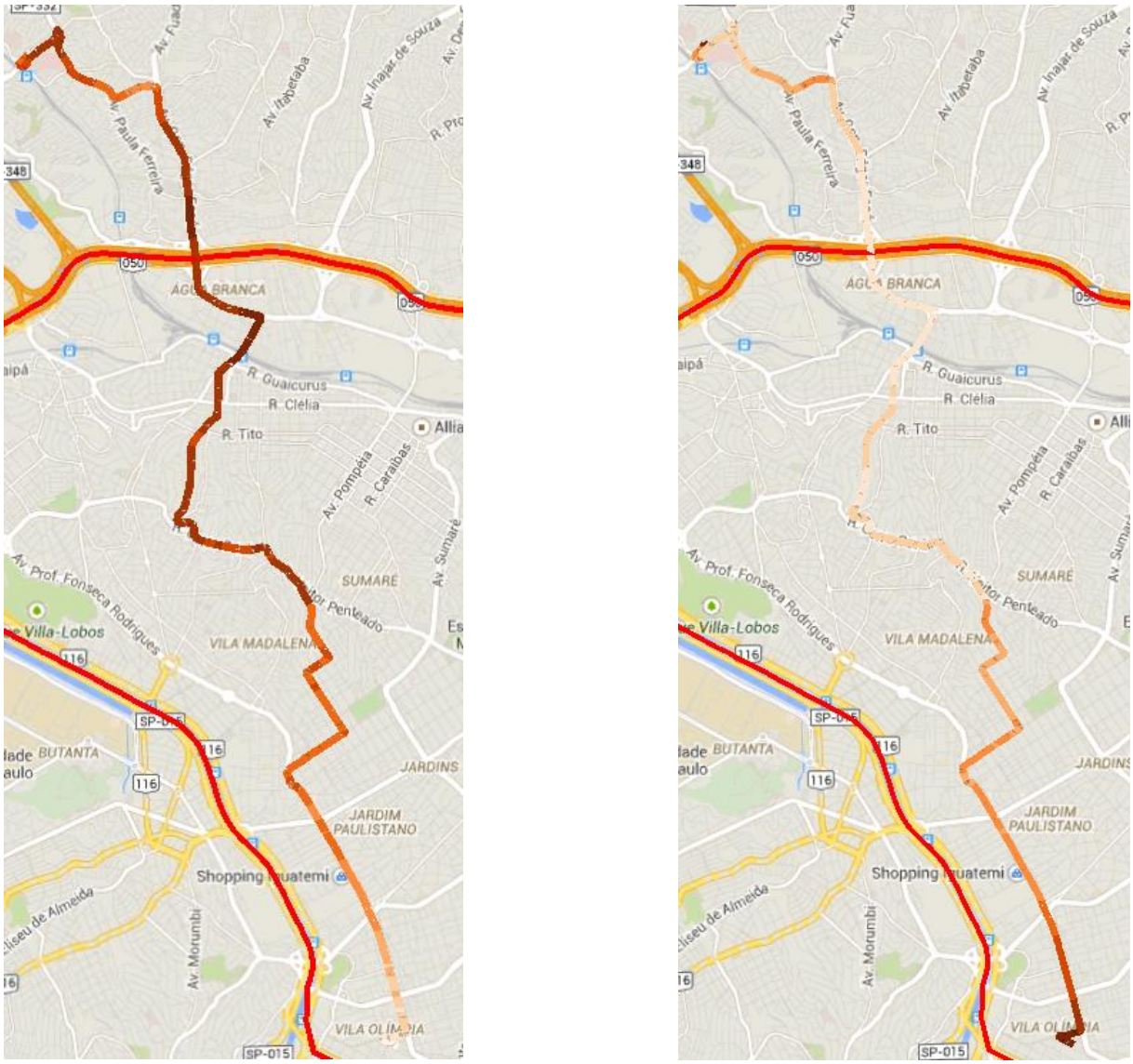
Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da SPTrans.

Após filtrar os dados de AVL da viagem escolhida e de expurgar inconsistências, restaram 165 registros de localização do veículo 11352 pertencentes à viagem em questão. Durante o mesmo período, foram registradas 258 "catracadas", das quais 229 conseguiram-se inferir os locais de desembarque (processo detalhado na seção 6.2.4.7). Após remoção dos registros que aparentavam ser inválidos (desembarque

antes do embarque), restaram 149 "catracadas". Estes registros restantes foram expandidos por um fator aproximado de 1,73 (igual a 258/149).

Na Figura 6.18 apresentam-se os mapas de carregamento e de vagas disponíveis.

Figura 6.18 (a) Carregamento da linha 847P-10; (b) Vagas disponíveis da linha 847P-10



(a) (b)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da SPTrans.

O valor do pax*km para a viagem em questão foi de aproximadamente 1141, enquanto que o vaga*km foi próximo a 219 (supondo uma capacidade total de 75 passageiros). Por fim, a ocupação para a viagem em questão foi de 83,9% e a ociosidade foi de 16,1%.

Ao final deste processo, percebe-se que é, de fato, possível avaliar a capacidade do sistema da SPTrans utilizando os dados disponíveis. No entanto, conforme já mencionado, algumas etapas (em especial a determinação do início e fim da viagem e a criação da tabela "sobe e desce" para avaliação do carregamento) podem consumir uma quantidade elevada de recursos a depender da magnitude do problema analisado. Neste caso, avaliou-se apenas uma viagem de um único veículo, portanto o tempo gasto foi relativamente pequeno. No entanto, para avaliar toda a rede da SPTrans, faz-se necessário a elaboração de uma estrutura maior capaz de lidar com os dados de forma sistemática.

6.2.4 *Scripts* desenvolvidos em Python

Conforme mencionado na seção 6.2.1, o volume de dados das bases AFC e AVL torna impossível o seu manuseio direto por meio de software de planilhas, como OpenOffice Calc. Faz-se necessário, portanto, lançar mão de alguma ferramenta de manuseio de banco de dados ou de programação. O presente autor utilizou a linguagem de programação Python e, principalmente, a biblioteca Pandas de manuseio de bancos de dados e a biblioteca NumPy para manuseio otimizado de "*arrays*".

Foram desenvolvidos diversos *scripts* em Python para o tratamento dos dados, todos eles disponíveis em http://goo.gl/k8q9Nq. Esta seção é dedicada ao detalhamento dos principais *scripts* desenvolvidos.

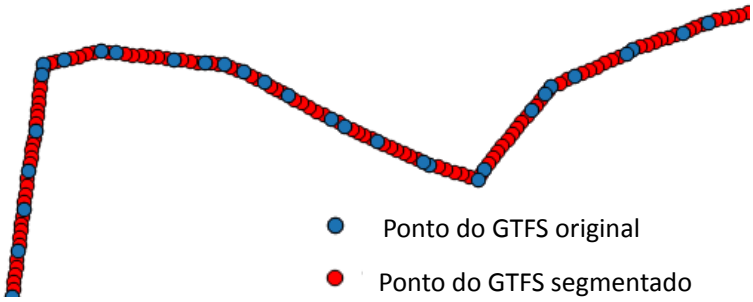
6.2.4.1 Divisão do GTFS de 10 em 10 metros

O GTFS contém, entre diversas outras informações, os traçados das linhas da SPTrans, CPTM e do METRÔ. A informação é disposta em uma sequência de pontos no espaço que, quando conectados, forma-se o traçado. No entanto, os arquivos geográficos das linhas podem conter pontos muito distantes entre si. Dependendo dos objetivos da análise, torna-se mais interessante uma base com intervalos com algum limite máximo de distância. Foi desenvolvido, portanto, um script que lê toda a base de arquivos geográficos do GTFS, subdivide-a em segmentos de tamanho estipulado pelo programador (para o presente trabalho, utilizou-se um limite de 10 metros) e gera um novo arquivo geográfico com mais

segmentos do que o arquivo original, porém com segmentos de menor comprimento. Além de diminuir as distâncias entre os pontos dos arquivos geográficos, dá-se a cada ponto do arquivo uma identificação.

A Figura 6.19 ilustra os pontos antes e depois da segmentação.

Figura 6.19 Segmentação do GTFS



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da SPTrans.

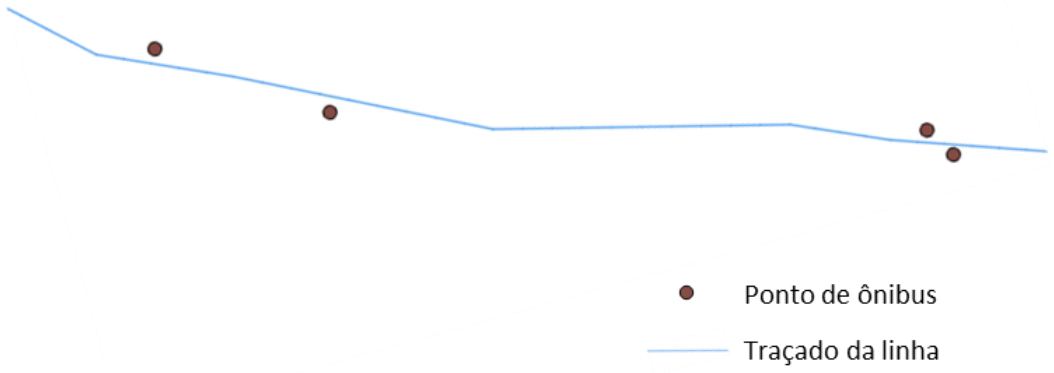
O *script* que realiza esta etapa é o "prepare_shapes_stops_stop_times_V4.py".

Além de ajustar os arquivos geográficos dos traçados, o *script* realiza a conversão de coordenadas Lat-Lon WGS84 em coordenadas X-Y da projeção UTM 23S no elipsoide WGS84. Esta conversão é feita não só para os arquivos geográficos dos traçados, mas também das paradas de ônibus.

6.2.4.2 Associação entre ponto de parada a ponto no arquivo geográfico da linha

A base dos pontos de ônibus do GTFS é separada da base dos traçados. A Figura 6.20 ilustra a questão.

Figura 6.20 Desencontro entre pontos de ônibus e traçado da linha



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da SPTrans.

Para estabelecer um elo entre as bases de pontos de ônibus e os traçados, desenvolveu-se o script "joining_GTFS_V7.py". Nele, identifica-se qual ponto do traçado está mais próximo do ponto de ônibus em questão.

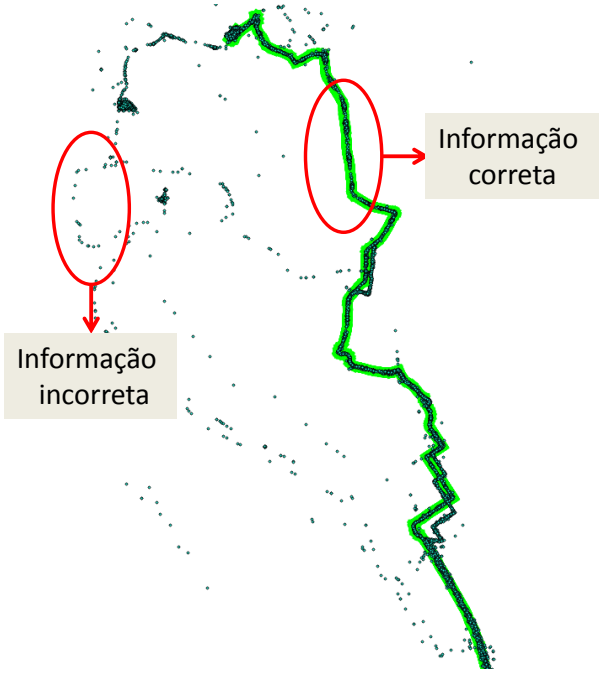
O script também realiza o "*merge*" com todas as outras colunas dos bancos de dados do GTFS e gera dois arquivos: um contendo informações completas sobre as linhas e outro contendo informações completas sobre as paradas.

6.2.4.3 Eliminação de inconsistências do AVL

Os dados de GPS dos ônibus contêm informações sobre qual a linha e qual o sentido nos quais o veículo está operando. No entanto, esta informação não está necessariamente correta. Por exemplo, um veículo que emitir sinal de GPS informando que ele está na linha *A* pode estar absolutamente fora do traçado da linha *A*. Essa avaliação é feita comparando o traçado da linha *A* e a localização dos sinais de GPS da linha *A*. A Figura 6.21 ilustra o problema.

Dependendo da análise desejada, as informações incorretas devem ser expurgadas. Para o tratamento dessas inconsistências, desenvolveu-se o *script* "clean_AVL.py". De forma resumida, o *script* lê a base de dados de AVL e os traçados do GTFS. Em seguida, são gerados "buffers" em torno dos traçados. Os sinais de GPS que estiverem fora dos buffers são marcados como "pontos inválidos".

Figura 6.21 Sinal de GPS cadastrado em linhas erradas



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da SPTrans.

Note que este procedimento não identifica qual a linha na qual o veículo realmente estava operando – somente marcam-se como inválidos os sinais de GPS com informação inconsistente.

Note também que o script desenvolvido também não serve para a remoção dos sinais de GPS que aparentam "voltar" na rota.

6.2.4.4 Cruzamento de AVL e GTFS

Os sinais de GPS possuem informação apenas sobre qual linha e qual o sentido em que o ônibus estiver operando. No entanto, deseja-se identificar em que ponto do traçado o veículo está. O script "joining_AVL_with_shapes_V2.py" foi desenvolvido com esta finalidade.

Olha-se para cada ponto da base de GPS e calcula-se a distância para todos os pontos do traçado. Associa-se, então, o ponto do traçado de menor distância ao registro de GPS.

6.2.4.5 Cruzamento de AFC e AVL

Um dos *scripts* mais elaborados e que merecem destaque nesta seção é aquele que consegue cruzar as informações de bilhetagem (AFC) com as informações de GPS (AVL), fornecendo como resultado uma base de bilhetagem com informação geográfica.

Para esta etapa, gerou-se o script "join_BLT_AVL_V5.py". A utilização deste script requer a posse de um arquivo chamado "Pre_Embarques.txt". Este arquivo contém informação sobre as catracas fixas pertencentes às estações de METRÔ e CPTM bem como as catracas fixas encontradas nos terminais de ônibus da SPTrans.

Os passos do script são detalhados a seguir:

- Leitura dos dados de AVL;
- Remoção dos dados de AVL que não pertencem à RMSP;
- Leitura dos dados de bilhetagem;
- Divisão dos dados de bilhetagem em dois blocos:
    - BLT_preemb: Bilhetagens ocorridas em catracas de pré-embarque;
    - BLT_bus: Bilhetagens ocorridas em catracas de ônibus;
- Para o bloco BLT_preemb, faz-se a associação direta com o arquivo "Pre_Embarques.txt";
- Para o bloco BLT_bus, associam-se os registros do banco AVL aos registros do BLT_bus por meio dos instantes nos quais as informações foram registradas (horário do envio do sinal de GPS do veículo e o horário em que ocorreu a bilhetagem);
- Associam-se as localizações dos ônibus aos registros do BLT_bus;
- Cria-se um único banco de dados, contendo a união de BLT_bus e BLT_preemb;

6.2.4.6 Identificação de sequência de embarques

Avaliando os diversos registros da base de bilhetagem, é possível inferir os pontos da sequência de embarques do mesmo "Bilhete Único".

Suponha que o cartão de "Bilhete Único" identificado por 1001 embarcou na linha *A* às 10:30 da manhã. Suponha também que o próximo embarque do cartão 1001 identificado na base de bilhetagem foi às 10:45 da manhã, na linha *B*.

Muitas vezes, a informação do próximo embarque é valiosa, como no caso de inferência de pontos de desembarque.

Para associar as sequências de embarques do mesmo "Bilhete Único", desenvolveu-se o script "merging_trips_V2.py".

O processo é bastante simples. Inicialmente, lê-se a base de dados de bilhetagens. Em seguida, a base é ordenada por identificador de "Bilhete Único" e por hora do registro. Por fim, criam-se conexões entre cada registro e o registro seguinte da base para os casos onde os identificadores de "Bilhete Único" são iguais e copia-se a informação do registro seguinte. Portanto, a base final contém, para cada registro, a informação da "catracada" em questão e também da próxima "catracada".

6.2.4.7 Inferência do local de desembarque

A partir dos dados resultantes do processo descrito na seção 6.2.4.6, pode-se estimar o local de desembarque dos passageiros. O autor desenvolveu o script "join_BLT_AVL_shapes_stops.py" para auxílio com esta tarefa.

A inferência baseia-se no local do próximo embarque do passageiro e também no traçado da linha em que a pessoa está embarcando. Para ilustrar o caso, retomemos o exemplo apresentado na seção 6.2.4.6. Apresenta-se uma ilustração do exemplo na Figura 6.22.

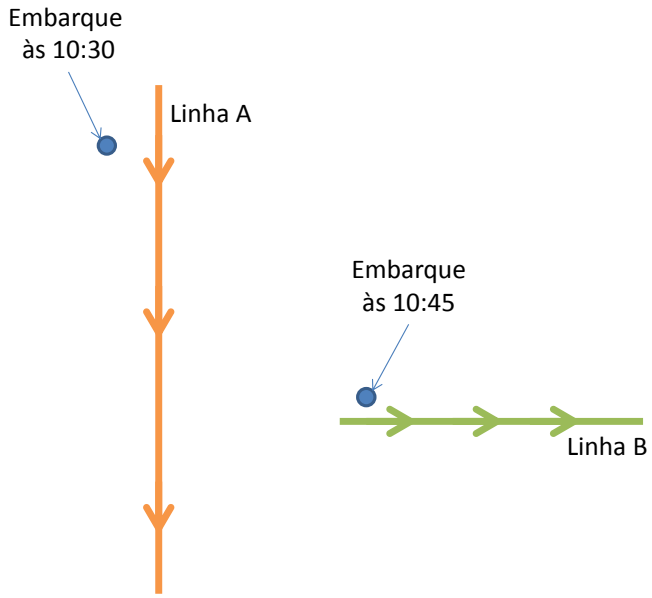
A ilustração nos informa que um indivíduo embarcou às 10:30 na linha *A* e às 10:45 na linha *B*. A inferência mais simples que pode ser feita é de que o indivíduo em questão desembarcou da linha *A* no ponto mais próximo do local de embarque na linha B. A Figura 6.23 ilustra o processo.

Para este processo, desenvolveu-se o script "join_BLT_AVL_shapes_stops.py".

6.2.5 Comentários sobre o estudo de capacidade

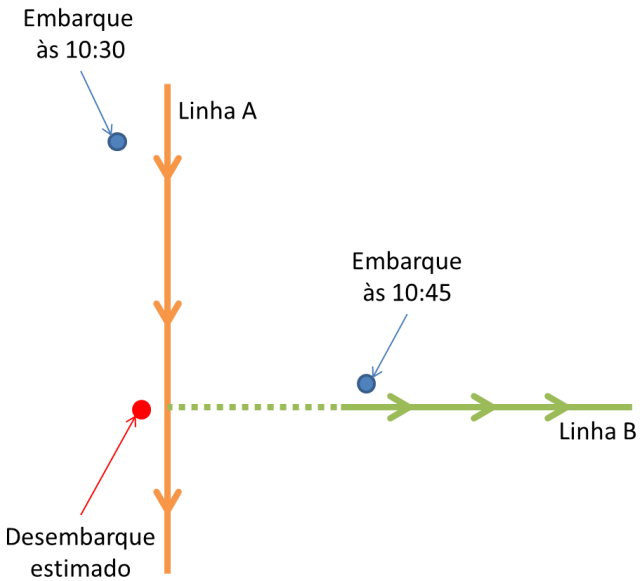
Com os exemplos ilustrados e os códigos já desenvolvidos, pôde-se mostrar que é, de fato, possível realizar o cálculo da capacidade do sistema de transporte público coletivo. No entanto, para que este cálculo seja aplicado a todo o sistema da SPTrans, do METRÔ e da CPTM, ainda há avanços a serem feitos.

Figura 6.22 Exemplo para inferência do local de desembarque



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.23 Inferência do local de desembarque



Fonte: Elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÕES

Nesta seção, são apontadas as principais conclusões do presente trabalho.

7.1 *Congestion charging* como política pública

O *congestion charging* é uma política pública polêmica e muitas vezes impopular, com uma enorme resistência (tanto pública quanto política) à sua implantação. No entanto, já existem casos de sucesso de implantação deste tipo de sistema, notadamente em Londres, Estocolmo e Cingapura.

Políticos e tomadores de decisão devem compreender que um sistema de *congestion charging* não é uma medida que resolverá todos os problemas de transportes de uma metrópole. Trata-se apenas de uma medida dentre possíveis. Caso os tomadores de decisão desejem, de fato, sanar os problemas de transportes de suas cidades, o *congestion charging* deverá ser acompanhado de diversas outras políticas públicas.

Um dos pontos mais importantes do sucesso do *congestion charging*, além de sua implantação paralela a outras políticas públicas, é a forma com a qual ele é implementado e a forma como a sua implementação é transmitida para a população.

Os tomadores de decisão não podem cair na tentação de olhar para o sistema de *congestion charging* apenas como uma fonte de renda para a máquina pública. Os conceitos básicos teóricos de sistemas de *congestion charging*, como a internalização das externalidades do congestionamento, devem ser respeitados. Caso contrário, o sistema de *congestion charging* deixará de ser uma poderosa ferramenta econômico-política e se transformará em uma simples forma de taxar os cidadãos e arrecadar dinheiro para a máquina pública, perdendo então todo o seu sentido.

7.2 Estimativas

Segundo as estimativas apresentadas, espera-se que um *congestion charge* modesto de apenas R$2,50 por automóvel consiga alterar a divisão modal em até 1,6 pontos percentuais a favor do Transporte Coletivo e gerar uma receita

aproximada de R$ 1 milhão na hora pico e R$ 250 milhões em um ano (Obs.: valores monetários em R$ de 2007).

O presente autor reitera, no entanto, que as projeções suscitadas neste trabalho devem ser consideradas apenas como guias e nunca como verdades absolutas. Para uma avaliação mais concreta e confiável do problema, sugere-se a elaboração de pesquisa própria para este fim. Lembra-se que o modelo e as estas projeções obtidas estão baseadas nos dados da Pesquisa Origem-Destino 2007 do METRÔ, uma pesquisa cujo objetivo não era, de fato, gerar informação para a elaboração de modelos de escolha discreta.

7.3 Avaliação da capacidade do transporte público coletivo da RMSP

Para a avaliação da capacidade do sistema de transporte público coletivo da RMSP, introduziram-se os conceitos de vaga*km e de ociosidade.

Mostrou-se que é possível calcular, com os dados disponíveis, o carregamento e a ociosidade do sistema de ônibus da SPTrans. No entanto, mostrou-se também que a automatização deste processo para toda a rede da SPTrans apresenta dificuldades, tais como a dificuldade de se identificar o fim de uma viagem e o início da viagem seguinte dos ônibus da SPTrans.

Caso deseje-se trabalhar com um caso reduzido, o processo é relativamente simples. Foi feita a análise de uma viagem realizada por um ônibus da linha 847P-10 – Terminal Pirituba-Itaim Bibi para ilustrar como este processo é feito.

Nesta seção também foram apresentados todos os *scripts* de Python desenvolvidos para esta etapa. Os *scripts* estão disponíveis em http://goo.gl/k8q9Nq.

7.4 Trabalhos futuros

O presente trabalho deixa diversos pontos em aberto para futuros pesquisadores que desejem aprofundar-se em questões relacionadas à avaliação de sistemas de *congestion charging* e à capacidade do transporte público coletivo. Segue uma lista não exaustiva das possibilidades de trabalhos futuros:

- Atualização do presente modelo de escolha discreta utilizando informação mais detalhada sobre os custos dos modos "Transporte Individual" e "Transporte Coletivo";
- Elaboração de modelo de escolha discreta com formas funcionais mais complexas, como, por exemplo, as variáveis "Custo" e "Tempo" interagindo com *dummies* socioeconômicas;
- Elaboração de modelo de escolha discreta mais sofisticado, como o "Mixed Logit";
- Elaboração de pesquisa de preferência declarada para obtenção de dados mais apropriados à estimação de modelos de escolha discreta;
- Avaliação de sistemas de *congestion charging* diferentes do sistema zonal no centro expandido de São Paulo considerado;
- Operacionalização da avaliação da capacidade de todo o sistema da SPTrans;
- Elaboração de método para avaliar a capacidade dos trens e metrôs da RMSP utilizando os dados disponíveis de AVL (*automated vehicle location*) e AFC (*automated fare collection*).

7.5 Disponibilização de dados e transparência

O presente autor coloca todos os arquivos utilizados e desenvolvidos durante o presente trabalho à disposição no site http://goo.gl/k8q9Nq.

REFERÊNCIAS

AQUINO, Y. CPMF foi errada, porque recursos não foram aplicados em saúde, diz Dilma. **UOL Notícias**, 1 set. 2011.

ARAGÃO, L. *et al.* Resultados das manifestações de junho. **G1 Notícias - São Paulo**, 28 jun. 2013.

ARCHDEACON, K. **London Congestion Charge**. Disponível em: <http://www.sustainablecitiesnet.com/models/london-congestion-charge/>. Acesso em: 13 nov. 2013.

ATKINSON, R. W. *et al.* The impact of the congestion charging scheme on ambient air pollution concentrations in London. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 34, p. 5493–5500, nov. 2009.

BALASSIANO, R.; SCARINGELLA, R. S. Pedágio Urbano. **Revista Movimento - Número 1**, p. 46–47, 2004.

BBC NEWS. **Congestion charge zone increases**. Disponível em: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/6368957.stm>. Acesso em: 11 nov. 2013.

BEN-AKIVA, M. E.; LERMAN, S. R. **Discrete choice analysis: theory and application to travel demand**. [s.l.] MIT Press, 1985.

BERTINI, R. L. **You are the traffic jam: an examination of congestion measures**Transportation Research Board 85th Annual Meeting. **Anais**...Washington DC: 2006Disponível em: <http://www.its.pdx.edu/pdf/congestion_trb.pdf>. Acesso em: 26 set. 2013

BÖRJESSON, M. *et al.* The Stockholm congestion charges—5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. **Transport Policy**, v. 20, p. 1–12, mar. 2012.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**Brasília, 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>

___. **Lei N° 12.587 de 3 de Janeiro de 2012 - Política Nacional de Mobilidade Urbana**Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>

CAMPOS FILHO, C. M. Pedágio urbano: solução quase mágica. **FDTE Informa**, p. 3, ago. 2013.

CINTRA, M. **Os custos do congestionamento na cidade de São Paulo**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/custos-do-congestionamento-em-sp.pdf>.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO. **Desempenho do Sistema Viário - 2004**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/sobre-a-cet/relatorios-corporativos.aspx>.

___. **Pesquisa de Monitoração e Fluidez - Desempenho do Sistema Viário - 2007**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/sobre-a-cet/relatorios-corporativos.aspx>.

___. **Rodízio Municipal - Como Funciona**. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/consultas/rodizio-municipal/como-funciona.aspx>. Acesso em: 21 out. 2013.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO - METRÔ. **Pesquisa Origem e Destino 2007 - Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.metro.sp.gov.br/metro/numeros-pesquisa/pesquisa-origem-destino-2007.aspx>.

COMSIS CORPORATION *et al.* **A Guidance Manual for Implementing Effective Employer-based Travel Demand Management Programs**. Washington DC: [s.n.]. Disponível em: <http://ntl.bts.gov/DOCS/474.html>.

DOWNS, A. **Still Stuck in Traffic: Coping with Peak-hour Traffic Congestion**. [s.l.] Brookings Institution Press, 2004.

ELIASSON, J. A cost–benefit analysis of the Stockholm congestion charging system. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 43, n. 4, p. 468–480, maio 2009.

___. **So you're considering introducing congestion charging? Here's what you need to know**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPapers/DP201004.pdf>.

EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTES URBANOS. **Relatorio Tarifário - RMSP**. [s.l: s.n.].

EUROPEAN CONFERENCE OF MINISTERS OF TRANSPORT. **Managing Urban Traffic Congestion**. [s.l.] OECD Publishing, 2007.

FELDMAN, B. **Na base da canetada**. Disponível em: <http://www.vrum.com.br/app/301,26/2012/07/07/interna_borisfeldman,46110/na-base-da-canetada.shtml>. Acesso em: 25 nov. 2013.

FRIGHETTO, M. Implantação do pedágio urbano em Florianópolis divide opiniões. **Diário Catarinense**, 7 jan. 2010.

G1 NOTÍCIAS - SÃO PAULO. Passagens de metrô, onibus e trem já estão mais caras em São Paulo. **G1 Notícias - São Paulo**, 30 nov. 2006.

___. Entenda como funciona a restrição aos caminhões em SP. **G1 Notícias - São Paulo**, 4 abr. 2012.

GOMIDE, A. DE Á.; MORATO, R. **Instrumentos de desestímulo ao uso do transporte individual motorizado: lições e recomendações**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.energiaeambiente.org.br/index.php/bibliotecas/download/38?arq=DesistimuloTransIndiv.pdf>.

GOODWIN, P. B. “Rule of three”. A possible solution to the political problem of computing objectives for road pricing. **Traffic Engineering and Control**, v. 30, n. 10, p. 495–497, 1989.

GUALDA, N. D. F. Impactos da evolução tecnológica dos transportes na sociedade: uma visão sistêmica. **Estudos Urbanos - Coleção Documentos**, v. 8, p. 17–28, 1994.

GUJARATI, D.; PORTER, D. C. **Basic Econometrics**. 5. ed. [s.l.] McGraw-Hill Irwin, 2008.

HO, R. *et al.* **Singapore**. Disponível em: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/545725/Singapore>. Acesso em: 25 nov. 2013.

HURST, D. **Changing Behaviour Without Changing Minds: the case of the Stockholm congestion charge**. Disponível em: <http://www.davidkhurst.com/changing-behaviour-without-changing-minds-the-case-of-the-stockholm-congestion-charge/>. Acesso em: 2 dez. 2013.

JORDÃO, C.; SALVO, M. P. DE. Pedágio urbano: o exemplo de Londres. **Veja São Paulo**, 15 jun. 2012.

KATCHOVA, A. **Multinomial Probit and Logit Models**. Disponível em: <https://sites.google.com/site/econometricsacademy/econometrics-models/multinomial-probit-and-logit-models>. Acesso em: 17 fev. 2015.

KOCKELMAN, K. M. Traffic Congestion. *In*: **Handbook of Transportation Engineering**. 1. ed. Austin, Texas: McGraw-Hill, 2003. .

KOPP, P.; PRUD’HOMME, R. The Economics of Urban Tolls: Lessons from the Stockholm Case. **International Journal of Transport Economics**, v. 57, n. 2, p. 195–221, 2010.

LITMAN, T. A. **Smart Congestion Relief**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.vtpi.org/cong_relief.pdf>.

LUCAS JUNIOR, R. **Metodologia para implantacão de Pedágio Urbano**. [s.l.] Instituto Milutar de Engenharia, 2008.

LUCE, D. R. **Individual Choice Behavior**. [s.l.] Wiley, 1959.

MAHENDRA, A. Vehicle Restrictions in Four Latin American Cities: Is Congestion Pricing Possible? **Transport Reviews**, v. 28, n. 1, p. 105–133, jan. 2008.

MCFADDEN, D. Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. *In*: **Frontiers in Econometrics**. [s.l.] Academic Press, 1973. p. 105–142.

MEYER, M. D. Demand management as an element of transportation policy: using carrots and sticks to influence travel behavior. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 33, n. 7–8, p. 575–599, set. 1999.

PALMA, A. DE; LINDSEY, R. Traffic congestion pricing methodologies and technologies. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 6, p. 1377–1399, dez. 2011.

PAQUETTE, R. J.; ASHFORD, N.; WRIGHT, P. H. **Transportation Engineering Planning and Design**. New York: The Ronald Press company, 1972.

PIGOU, A. C. **The Economics of Welfare**. London: MACMILLAN AND CO., LIMITED, 1920.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Lei N° 12.490 de 3 de Outubro de 1997 - Programa de Restrição ao Trânsito de Veículos Automotores**São Paulo, 1997. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=04101997L 124900000>

___. **Lei N° 14.971 de 25 de Agosto de 2009 - A atividade de fretamento no âmbito do Município de São Paulo**São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=26082009L 149710000>

___. **Solicitação de Autorização Especial de Trânsito (AET) para Zona de Máxima Restrição de Fretamento (ZMRF)**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/saiba_como_e_e_como_funciona/index.php?p=4690>. Acesso em: 2 dez. 2013.

PRUD'HOMME, R.; BOCAREJO, J. P. The London congestion charge: a tentative economic appraisal. **Transport Policy**, v. 12, n. 3, p. 279–287, maio 2005.

QUDDUS, M. A. *et al.* The impact of the congestion charge on the retail business in London: An econometric analysis. **Transport Policy**, v. 14, n. 5, p. 433–444, set. 2007.

RAVELING, P. **Traffic Engineering: Planning for traffic loads**. Disponível em: <http://www.sierrafoot.org/local/gp/engineering.html>. Acesso em: 20 out. 2013.

REHM, T. **I-85 HOT lane: "Lexus Lanes" or an option for all?** Disponível em: <http://gapundit.com/2013/08/25/i-85-hot-lane-lexus-lanes-or-an-option-for-all-www-myajc-com/>. Acesso em: 25 nov. 2013.

RIBEIRO, L. Governo prorroga redução de IPI para veículos. **O Estado de São Paulo**, 1 abr. 2013.

RIVASPLATA, C. R. Congestion pricing for Latin America: Prospects and constraints. **Research in Transportation Economics**, v. 40, n. 1, p. 56–65, abr. 2013.

ROCHA, R. Estudo sobre custo de congestionamento em SP tem metodologia precária e propostas inadequadas, diz especialista. **Mobilize - Mobilidade Urbana Sustentável**, 3 jun. 2013.

SÃO PAULO. **Produto Interno Bruto – PIB Municipal**. Disponível em: <http://www.seade.gov.br/produtos/pibmun/index.php>. Acesso em: 21 out. 2013.

SCHRANK, D.; EISELE, B.; LOMAX, T. **Urban Mobility Report**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://tti.tamu.edu/documents/mobility-report-2012-wappx.pdf>.

SEABRA, A.; SOFIA, J.; AMORA, D. Empresa alemã Siemens delata cartel em licitações do metrô de SP. **Folha de São Paulo**, 14 jul. 2013.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. **PITU 2025 - Plano Integrado de Transportes Urbanos**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.stm.sp.gov.br/index.php/sumario-executivo>.

SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES - SÃO PAULO. **Portaria N° 51 de 2013 - Estabelece regras específicas para a atividade de fretamento, delimita a Zona de Máxima Restrição de Fretamento no Município de São Paulo e dá outras providências**São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=20062013P 000512013SMT>

SECRETARIA MUNICIPAL DO DESENVOLVIMENTO URBANO. **SP 2040 - A Cidade Que Queremos**. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <http://www.habisp.inf.br/theke/documentos/outros/sp2040-acidadequequeremos/>.

STOPHER, P. R. Reducing road congestion: a reality check. **Transport Policy**, v. 11, n. 2, p. 117–131, abr. 2004.

SWEDISH TRANSPORT AGENCY. **Location of control points**. Disponível em: <http://www.transportstyrelsen.se/en/road/Congestion-tax/Congestion-tax-in-stockholm/Location-of-control-points/>. Acesso em: 11 nov. 2013.

TRAIN, K. E. **Discrete choice methods with simulation**. [s.l.] Cambridge university press, 2009.

TRANSPORT FOR LONDON. **Central London Congestion Charging - Impacts Monitoring - First Annual Report**. London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/6722.aspx>.

___. **Pay online**. Disponível em: <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/6743.aspx>. Acesso em: 11 nov. 2013b.

___. **Central London Congestion Charging - Impacts Monitoring - Second Annual Report**. London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/congestioncharging/6722.aspx>.

___. **What do I need to know about the central London Congestion Charge camera system?** London: [s.n.]. Disponível em: <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/CC-Cameras.pdf>.

UCHO INFO. **Populismo barato de Fernando Haddad transforma a cidade de SP em mar de congestionamentos**. Disponível em: <http://ucho.info/populismo-barato-de-fernando-haddad-transforma-a-cidade-de-sp-em-mar-de-congestionamentos-2>. Acesso em: 4 dez. 2013.

VÄGVERKET - SWEDISH ROAD ADMINISTRATION. **Trial Implementation of a Congestion Tax in Stockholm Contents**. Stockholm: [s.n.]. Disponível em: <http://www.stockholmsforsoket.se/upload/Infomaterial VV/Booklet eng.pdf>.

VALE, C. DO. Extinção e encurtamento de linhas de ônibus afetam 60 mil em SP. **O Estado de São Paulo**, 25 out. 2013.

VASCONCELLOS, E. A. DE. Pedágio urbano: melhorar para quem? **FDTE Informa**, p. 3, out. 2013.

WINSLOTT-HISELIUS, L. *et al.* The development of public attitudes towards the Stockholm congestion trial. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 43, n. 3, p. 269–282, mar. 2009.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory Econometrics**. 5. ed. [s.l.] Cengage Learning, 2012.

YAP, J.; GWEE, E. **Implementing Road and Congestion Pricing Lessons from Singapore**Implementing Sustainable Urban Travel Policies in Japan & other Asia-Pacific Countries. **Anais**...Tokyo: European Conference of Ministers of Transport - Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Japanese Government, 2005Disponível em: <http://www.internationaltransportforum.org/IntOrg/ecmt/urban/Tokyo2005.html>

APÊNDICE A – MODELOS DE ESCOLHA DISCRETA

As seções A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5 são fortemente baseadas nos conceitos apresentados no livro "*Discrete Choice Methods With Simulation*" (Train, 2009).

A.1 Base conceitual e teórica

Os modelos de escolha discreta foram elaborados para descrever as escolhas feitas por tomadores de decisão quando estes são deparados com algum conjunto de alternativas. Os tomadores de decisão podem ser pessoas, domicílios, empresas, ou qualquer outra unidade tomadora de decisão. As alternativas podem representar produtos que competem entre si, ações a serem tomadas, ou quaisquer outras alternativas entre as quais se tenha que fazer alguma escolha.

Um conjunto de alternativas deve possuir três características principais:

- As alternativas de um determinado conjunto devem ser mutuamente excludentes. Em outras palavras, o tomador de decisão escolhe apenas uma alternativa, e escolher uma das alternativas do conjunto significa não escolher nenhuma das outras alternativas;
- O conjunto de alternativas deve ser exaustivo, ou seja, todas as opções devem ser incluídas;
- O conjunto de alternativas deve ser finito.

Os modelos de escolha discreta são geralmente derivados sob a ótica de agentes com comportamento de maximização de utilidade. Portanto, supõe-se que o tomador de decisão sempre escolha a alternativa que lhe providencie a maior utilidade.

Em seguida, é feita a apresentação formal do modelo genérico de escolha discreta.

Considere que um tomador de decisão, identificado como n, deve escolher uma das J alternativas disponíveis. Cada alternativa j proporciona ao tomador de decisão n uma utilidade U_{nj}, $j = 1, \ldots, J$. Partindo da premissa de maximização de utilidade, o modelo comportamental é, portanto: o tomador de decisão n escolhe alternativa i se e somente se $U_{ni} > U_{nj} \; \forall \; j \neq i$.

O pesquisador, ao tentar compreender o comportamento do tomador de decisão, consegue observar apenas alguns dos atributos das alternativas que o tomador de decisão enxerga. Estes atributos são identificados como x_{nj}, $\forall$ j. O pesquisador consegue observar também algumas características (não necessariamente todas) do próprio tomador de decisão, identificadas como s_n. Com estas informações, o pesquisador consegue especificar uma função utilidade que relaciona essas características observadas com a utilidade provida ao tomador de decisão. Esta função é:

$$V_{nj} = V(x_{nj}, s_n) \; \forall \; j$$

Esta parcela é denominada "utilidade representativa".

Dado que existem características da utilidade que o pesquisador não consegue observar, há uma diferença entre V_{nj} e U_{nj}. A utilidade pode, portanto, ser decomposta em dois termos:

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \, ,$$

onde $\boldsymbol{\varepsilon}_{nj}$ captura os fatores que afetam a utilidade, mas que não estão incluídos em V_{nj}.

As características de $\boldsymbol{\varepsilon}_{nj}$ (tais como a sua distribuição) dependem fundamentalmente da especificação de V_n definida pelo pesquisador.

Dado que o pesquisador não consegue observar U_{nj} $\forall$ j, ele tampouco consegue observar $\boldsymbol{\varepsilon}_{nj}$ $\forall$ j. Isso leva o pesquisador a tratar estes termos como aleatórios.

A distribuição de probabilidade conjunta do vetor $\boldsymbol{\varepsilon}'_n = \langle \boldsymbol{\varepsilon}_{n1}, \ldots, \boldsymbol{\varepsilon}_{nJ} \rangle$ é identificada como $\boldsymbol{f(\varepsilon_n)}$. Com esta distribuição, o pesquisador consegue fazer inferências probabilísticas quanto às decisões do tomador de decisão.

A probabilidade do tomador de decisão n escolher a alternativa i é tal que:

$$P_{ni} = Prob\left(U_{ni} > U_{nj} \; \forall \; \mathrm{j} \neq \mathrm{i}\right)$$

$$= Prob\left(V_{ni} + \varepsilon_{ni} > V_{nj} + \varepsilon_{nj} \; \forall \; \mathrm{j} \neq \mathrm{i}\right)$$

$$= Prob\left(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj} \; \forall \; \mathrm{j} \neq \mathrm{i}\right)$$

Esta é a função que mede a probabilidade de a diferença entre os termos não observados (ε_{nj} - ε_{ni}) ser menor do que a diferença entre as utilidades representativas (V_{ni} - V_{nj}). Em outras palavras, a probabilidade da escolha da alternativa *i* depende não só da fração observada da utilidade, mas também de como se comportam os termos não observadas, principalmente, de como as diferenças entre esses termos se comportam.

Para ilustrar a situação, suponhamos que um tomador de decisão *n* se depara com duas alternativas: *a* e *b*. O pesquisador interessado em modelar o comportamento do tomador de decisão consegue observar que as utilidades representativas são, respectivamente V_{na} = 3 e V_{nb} = 4. O fato da utilidade representativa V_{nb} ser maior do que V_{na} não significa que o tomador de decisão *n* sempre irá escolher a alternativa *b*. A escolha do usuário será guiada pela diferença das utilidades representativas (nesse caso igual a 1) e pela diferença dos termos não observados ε_{na} e ε_{nb}. Mais especificamente, o tomador de decisão escolherá a alternativa *a* quando a diferença (ε_{na} - ε_{nb}) for maior do que 1 e a alternativa *b* quando ela for menor do que 1.

Utilizando a densidade conjunta $f(\varepsilon_n)$, esta probabilidade cumulativa pode ser representada por:

$$P_{ni} = Prob\left(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj} \; \forall \; \mathrm{j} \neq \; i\right)$$

$$= \int_{\varepsilon} I\left(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj} \; \forall \; \mathrm{j} \neq \; i\right) f(\varepsilon_n) d\varepsilon_n \quad ,$$

onde I(·) é a função indicadora que é igual a 1 quando a expressão dentro dos parêntesis é verdade e 0 caso contrário.

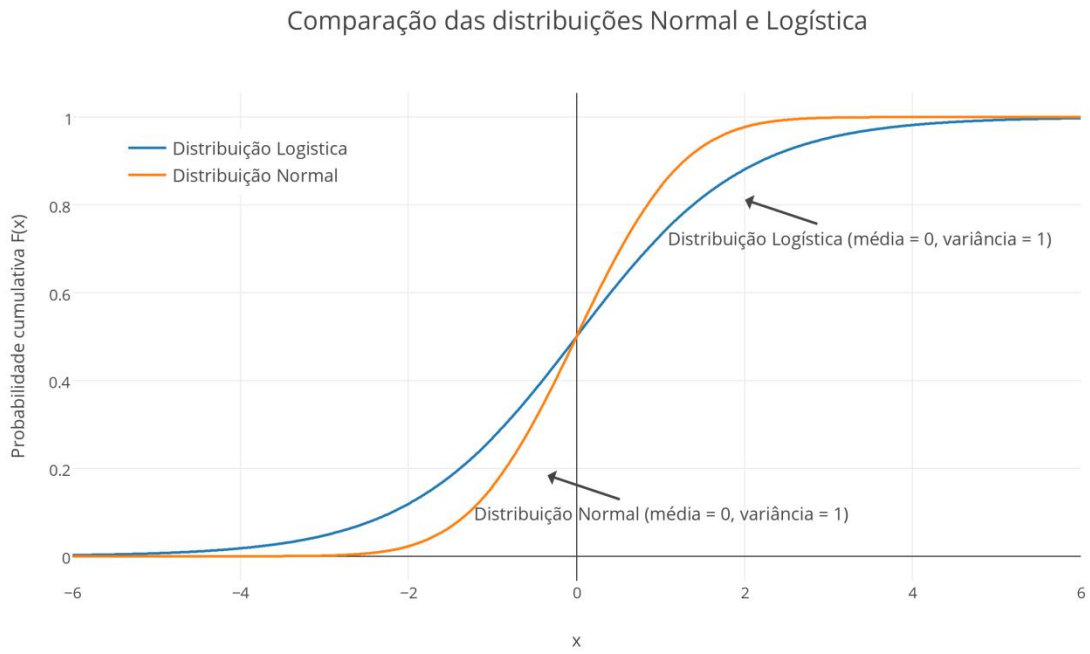
Os diversos modelos utilizados distinguem-se, portanto, pela distribuição escolhida para representar $f(\varepsilon_n)$.

A.2 Modelos Logit

A formulação dos modelos logit foi proposta originalmente por Duncan R. Luce (Luce, 1959) e popularizadas principalmente por Daniel McFadden (McFadden, 1973).

A vasta utilização do modelo logit se deve por três motivos: a sua fácil interpretação, a sua facilidade de cálculo e a semelhança entre as distribuições logística e normal (Fig. 1).

Fig. 1 Comparação das distribuições Normal e Logística



Fonte: Elaborado pelo autor. Versão interativa disponível em: https://plot.ly/~phildias/250.

Uma das grandes dificuldades dos modelos de escolha discreta era a estimação dos seus parâmetros, que em muitos casos dependiam de cálculos de integrais com intervalos abertos.

Por exemplo, ao assumir que os termos não observados ε_{nj} possuem uma distribuição normal, a integral a ser calculada para se obter P_{ni} torna-se extremamente difícil de resolver algebricamente.

Já os modelos logit assumem que cada ε_{nj} seja um valor extremo, distribuído idependente- e identicamente ("*independently, identically distributed extreme value*"), ou seja, que os termos não observados ε_{nj} possuem distribuição Gumbel tipo I.

Assume-se, então, que a função de densidade de probabilidade de cada termo ε_{nj} seja descrita por:

$$f(\varepsilon_{nj}) = \exp(-\varepsilon_{nj}) \cdot \exp(-exp(-\varepsilon_{nj}))$$

Em seguida, deriva-se que a função distribuição de cada termo $\boldsymbol{\varepsilon_{nj}}$ seja descrita por:

$$F(\varepsilon_{nj}) = \exp(-exp(-\varepsilon_{nj}))$$

Essa premissa leva à conclusão de que a probabilidade do tomador de decisão *n* escolher a alternativa *i* pode ser calculada por:

$$P_{ni} = \frac{\exp(V_{ni})}{\sum_j \exp(V_{nj})}$$

Omite-se aqui a sequência de cálculo para alcançar a equação de probabilidade acima, no entanto, o presente autor recomenda que, caso o leitor deseje aprofundar-se na derivação matemática, os passos detalhados podem ser encontrados no livro "Discrete Choice Methods with Simulation" (Train, 2009), pág. 34 e no artigo publicado originalmente por Daniel McFadden (McFadden, 1973).

Existem três grandes características dos modelos logit que ilustram tanto a sua robustez quanto as suas limitações. São elas:

- A especificação que o pesquisador dá à utilidade representativa faz com que o modelo logit preveja substituição proporcional entre as alternativas, propriedade essa também conhecida como "independência de alternativas irrelevantes". Isso traz a tona o problema do "*blue bus/red bus*", detalhado na seção A.3.
- A especificação que o pesquisador dá à utilidade representativa também faz com que o modelo logit consiga representar somente variações de preferência sistemáticas, ou seja, variações de preferência ligadas às características observadas. No entanto, variações aleatórias (associadas a características não observadas) não conseguem ser representadas pelo modelo logit.
- No caso de medidas repetidas no tempo (como, por exemplo, dados em painel), os modelos logit conseguem capturar os efeitos das escolhas repetidas somente no caso de os termos não observados serem independentes do tempo. Em outras palavras, o modelo logit não consegue lidar com situações em que os fatores não observados são correlacionados no tempo.

A.3 Independência de alternativas irrelevantes – IAI

Esta seção é dedicada à discussão de uma das principais propriedades dos modelos logit: a independência de alternativas irrelevantes – IAI.

A propriedade de IAI dita que a proporção entre as probabilidades de duas alternativas *i* e *k* seja independente da todas das outras alternativas disponíveis para o tomador de decisão. A seguir, ilustra-se este fato matematicamente:

$$\frac{P_{ni}}{P_{nk}} = \frac{\exp(V_{ni}) / \sum_j \exp(V_{nj})}{\exp(V_{nk}) / \sum_j \exp(V_{nj})} = \frac{\exp(V_{ni})}{\exp(V_{nk})} = \exp(V_{ni} - V_{nk}) \ ,$$

onde:

P_{ni} : Probabilidade do tomador de decisão n escolher a alternativa *i*
P_{nk} : Probabilidade do tomador de decisão n escolher a alternativa *k*
V_{ni} : Utilidade representativa da alternativa *i* para o tomador de decisão *n*
V_{nk} : Utilidade representativa da alternativa *k* para o tomador de decisão *n*

Nota-se, portanto, que a relação entre as probabilidades das alternativas *i* e *k* depende única e exclusivamente de suas utilidades representativas, excluindo a necessidade de levar em consideração as outras alternativas.

Uma das principais limitações que essa propriedade impõe é mais bem ilustrada por meio do exemplo "*blue bus/red bus*", detalhado a seguir.

Suponha que um tomador de decisão possui apenas duas alternativas para realizar a sua viagem ao trabalho: viajar de carro ou viajar com um ônibus azul. Suponha que as utilidades representativas V_{Carro} e $V_{Ônibus\ Azul}$ sejam iguais. Sob a ótica de modelos logit, isso resulta na probabilidade das duas alternativas serem iguais: $P_{Carro} = P_{Ônibus\ Azul} = 1/2$. Neste caso, a relação $P_{Carro} / P_{Ônibus\ Azul}$ é igual a 1.

Suponha agora que seja incluída uma nova alternativa para o tomador de decisão: um ônibus vermelho. Este ônibus vermelho, aos olhos do tomador de decisão, possui absolutamente todas as características idênticas ao ônibus azul inicialmente disponível – a única diferença é a cor do ônibus. Isso fará com que a utilidade representativa do ônibus vermelho seja igual à utilidade representativa do ônibus azul. Consequentemente, a probabilidade do tomador de escolher o ônibus vermelho

será igual à probabilidade dele escolher o ônibus azul. Em outras palavras, a relação $P_{Ônibus\ Vermelho}$ / $P_{Ônibus\ Azul}$ é igual a 1.

Já vimos anteriormente que a relação P_{Carro} / $P_{Ônibus\ Azul}$ é igual a 1. Essa relação é mantida constante, pois o modelo logit prevê que esta relação seja independente da existência ou não da alternativa "Ônibus Vermelho". Portanto, a única combinação de probabilidades onde:

$$\frac{P_{Carro}}{P_{Ônibus\ Azul}} = 1 \ ,$$

$$\frac{P_{Ônibus\ Vermelho}}{P_{Ônibus\ Azul}} = 1 \ , \qquad e$$

$$P_{Carro} + P_{Ônibus\ Vermelho} + P_{ÔnibusAzul} = 1$$

é quando $P_{Carro} = P_{Ônibus\ Vermelho} = P_{Ônibus\ Azul} = 1/3$.

No entanto, quando se analisa o caso sob a perspectiva do mundo real, não se espera que a probabilidade do tomador de decisão escolher o carro diminua de 1/2 para 1/3. Racionalmente, o que deveria acontecer seria a probabilidade do carro continuar igual a 1/2, enquanto que a probabilidade do ônibus azul diminuir para 1/4, valor este igual à probabilidade do ônibus vermelho.

Casos como este são razoavelmente raros, no entanto o exemplo serve para ilustrar as consequências do modelo logit e a sua inadequação quando se deseja avaliar a introdução de uma nova alternativa que possa alterar a relação entre as probabilidades das alternativas.

Apesar da limitação demonstrada acima, a propriedade de IAI faz com que o pesquisador possa limitar a sua modelagem a um subconjunto das alternativas consideradas (Train, 2009).

A.4 Considerações sobre as formas funcionais da utilidade

Para fins meramente ilustrativos, consideremos uma situação onde um tomador de decisão *n* deve escolher entre três meios de transporte: ônibus, automóvel e teletransporte. Consideremos também que a utilidade de cada alternativa seja influenciada pelo custo e tempo de cada alternativa, bem como pela renda de cada

tomador de decisão. Considerando que as variáveis influenciam a utilidade de forma aditiva e linear nos parâmetros, pode-se representar a utilidade das alternativas da seguinte forma:

$$U_n^{ônib} = \beta_{custo} \cdot custo_{ônib} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{ônib} + \varepsilon_n^{onib}$$

$$U_n^{auto} = \beta_{auto} + \beta_{custo} \cdot custo_{auto} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{auto} + \beta_{renda}^{auto} \cdot renda_n + \varepsilon_n^{auto}$$

$$U_n^{tele} = \beta_{tele} + \beta_{custo} \cdot custo_{tele} + \beta_{tempo} \cdot tempo_{tele} + \beta_{renda}^{tele} \cdot renda_n + \varepsilon_n^{tele},$$

onde:

$U_n^{ônib}$: Utilidade do modo “Ônibus”
U_n^{auto} : Utilidade do modo “Automóvel”
U_n^{tele} : Utilidade do modo “Teletransporte”
β_{auto} : Constante do modo “Automóvel”
β_{tele} : Constante do modo “Teletransporte”
β_{custo} : Coeficiente da variável “custo”
β_{tempo} : Coeficiente da variável “tempo”
β_{renda}^{auto} : Coeficiente da variável “renda” do modo "Automóvel"
β_{renda}^{tele} : Coeficiente da variável “renda” do modo "Teletransporte"
$custo_{ônib}$: Custo da viagem do modo “Ônibus”, em R$
$custo_{auto}$: Custo da viagem do modo “Automóvel”, em R$
$custo_{taxi}$: Custo da viagem do modo “Táxi”, em R$
$tempo_{ônib}$: Tempo da viagem do modo “Ônibus”, em minutos
$tempo_{auto}$: Tempo da viagem do modo “Automóvel”, em minutos
$tempo_{taxi}$: Tempo da viagem do modo “Táxi”, em minutos
$renda_n$: Renda líquida mensal do tomador de decisão *n*, em R$

Da formulação acima, pode-se notar algumas características relevantes, entre elas:

- O modo "Ônibus" não possui uma constante de modo;
- Os coeficientes de renda β_{renda}^{auto} e β_{renda}^{tele} podem ser diferentes um do outro. Além disso, o modo "Ônibus" não possui coeficiente de renda.
- Os coeficientes β_{custo} e β_{tempo} são considerados únicos para as três alternativas. Isso faz com que o custo e o tempo influenciem a utilidade da mesma forma nas três alternativas.

O modo "Ônibus" não possui constante de modo nem coeficiente de renda pelo fato de o pesquisador conseguir avaliar apenas as diferenças de utilidade entre as alternativas. Para possibilitar a estimação, portanto, geralmente adota-se uma das alternativas como referência. Isso significa que os coeficientes β_{renda}^{auto} e β_{renda}^{tele} não são os coeficientes reais e absolutos – eles são, portanto, os coeficientes que representam a influência na utilidade de cada alternativa relativamente à alternativa de referência (nesse caso, escolhido como o modo "Ônibus").

Algo semelhante pode ser dito sobre a variável de renda. Se o pesquisador consegue avaliar apenas as diferenças entre as utilidades das alternativas, seria impossível adotar um único coeficiente de renda para os três modos, uma vez que o termo $\beta_{renda} \cdot renda_n$ constaria na utilidade dos três modos avaliados, fazendo com que, ao se calcular a diferença entre as utilidades de duas alternativas, o termo seria excluído. Portanto, para o caso de variáveis que possuam o mesmo valor em todas as alternativas (como é o caso da renda no exemplo ilustrado), adota-se uma das alternativas como referência (neste caso, o modo "Ônibus"). Isso faz com que os coeficientes das outras alternativas representem a influência relativa que uma variável possa ter em relação à alternativa de referência.

Colocando em termos mais concretos, consideremos que a variável $renda_n$ represente a renda líquida mensal do tomador de decisão *n* em R$. Consideremos também que, após a estimação do modelo, descobrimos que o coeficiente β_{renda}^{auto} possui sinal positivo. Isso significa que cada R$ adicional na renda aumenta a utilidade do modo "Automóvel" em relação à do modo "Ônibus". Ou seja, quanto maior for a renda do tomador de decisão, maior a probabilidade deste tomador de decisão escolher a alternativa "Automóvel" em relação à alternativa "Ônibus".

Outro ponto interessante do exemplo ilustrado acima é a possibilidade da extração do coeficiente "valor do tempo", conhecido em inglês como "*value of travel time savings*". Segue uma breve explicação de como isso é feito.

A forma funcional e as variáveis escolhidas para o modelo acima possibilitam a extração do valor do tempo através dos coeficientes β_{custo} e β_{tempo}. Estes coeficientes nos indicam a relação entre unidades de utilidade e unidades das variáveis tempo e custo. Em outras palavras, estes coeficientes traduzem as variáveis de custo e tempo e as colocam em um único sistema de medida. Isso faz com que possamos

comparar as duas variáveis e compreender os seus padrões de substituição. Podemos avaliar o quanto um minuto altera a utilidade e, em seguida, avaliar quantos R$ são necessários para causar uma alteração da utilidade da mesma magnitude.

Apresenta-se, a seguir, o cálculo do valor do tempo com uma simples análise dimensional:

$$Valor\ do\ Tempo = \frac{\beta_{tempo}}{\beta_{custo}} = \frac{\frac{unidades\ de\ utilidade}{minuto}}{\frac{unidades\ de\ utilidade}{R\$}}$$

$$= \frac{\frac{1}{minuto}}{\frac{1}{R\$}} = \frac{R\$}{minuto}$$

A.5 Estimação dos coeficientes de modelos logit

Ao se elaborar um modelo de escolha discreta, um dos pontos centrais que o pesquisador busca compreender é como, de fato, as variáveis observadas influenciam o comportamento dos tomadores de decisão. Esta influência é representada não só pela forma funcional que o pesquisador dá à utilidade, mas também pelo conjunto dos coeficientes β.

De forma geral, o pesquisador não conhece os valores reais de β e procura, portanto uma aproximação para os seus reais valores.

Quando tratamos de regressões lineares, buscamos o conjunto de coeficientes β que minimize os erros entre os valores modelados e os valores observados (erro este geralmente compreendido como a soma dos quadrados das diferenças entre valores modelados e observados). Esta modelagem mostra-se bastante apropriada para a regressão de variáveis contínuas.

No entanto, quando tratamos de variáveis categóricas, torna-se necessário lançar mão de outro processo de estimação: a maximização da verossimilhança.

Aqui será apresentado um caso simples para ilustrar como a regressão linear é inadequada para modelos de escolha discreta. Considere uma situação em que se

deseja regredir a variável y binária (só pode ser igual a 0 ou 1) com base na variável x (x ∈ R). Ao realizar a regressão linear, teremos o modelo a seguir:

$$\widehat{y_i} = \alpha + \beta \cdot \mathrm{x_i}$$

Note que $\widehat{y_i}$ não está restrito aos valores discretos 0 e 1. Dependendo de como se comporta a variável x_i, a variável $\widehat{y_i}$ pode assumir qualquer valor na escala dos números reais.

Este é apenas um dos problemas relacionados à estimação modelos de escolha discreta. Os livros "Basic Econometrics" (Gujarati e Porter, 2008), pág. 541, e "Introductory Econometrics – A modern approach" (Wooldridge, 2012), pág. 248 oferecem explicações mais elaboradas sobre a inadequação da estimação de coeficientes pelo método dos mínimos quadrados quando se deseja modelar uma variável dependente discreta.

Conforme já mencionado acima, a estimação dos coeficientes β é realizada através da maximização da verossimilhança.

Considere o caso onde um conjunto *N* de tomadores de decisão escolheram uma alternativa entre um conjunto J de alternativas.

Conforme explicado na seção A.1, a utilidade que cada alternativa *j* fornece ao tomador de decisão *n* é:

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj} \ ,$$

onde a utilidade representativa é:

$$V_{nj} = V(x_{nj}, s_n) \forall \, j \, ,$$

sendo x_{nj} e s_n conhecidos pelo pesquisador (notação igual àquela utilizada na seção A.1).

O modelo logit prevê que a probabilidade de um indivíduo *n* escolher a alternativa *j* é:

$$P_{ni} = \frac{\exp(V_{ni})}{\sum_j \exp(V_{nj})}$$

Considere também que temos uma base de dados que contenha não só as variáveis x_{nj} e s_n que afetam a utilidade representativa, mas também a real escolha observada para cada tomador de decisão.

Pode-se expressar a probabilidade do tomador de decisão *n* escolher a alternativa que ele escolheu de fato como:

$$\prod_{j=1}^{J} \left(P_{nj}\right)^{y_{nj}} ,$$

onde y_{ni} = 1 caso o tomador de decisão realmente escolheu a alternativa *j* e 0 caso contrário.

Assumindo que as decisões dos tomadores de decisão sejam independentes uma das outras, a probabilidade conjunta de que todos os tomadores de decisão escolham a alternativa que eles de fato escolheram é:

$$L(\beta) = \prod_{n=1}^{N} \prod_{j=1}^{J} \left(P_{nj}\right)^{y_{nj}} ,$$

onde β é um vetor contendo os coeficientes do modelo. L(β) é a verossimilhança do modelo.

Por uma questão de processamento, não se trabalha normalmente com a verossimilhança, mas sim com LL(β) ,o logaritmo da verossimilhança:

$$LL(\beta) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{j=1}^{J} y_{nj} \cdot \ln(P_{nj})$$

Dada a característica monotônica da função logarítmica, essa transformação não altera o ponto de máximo da função LL(β).

Conhecendo LL(β), utiliza-se algum processo de otimização para encontrar β tal que LL seja maximizada.

Para facilitar a estimação dos coeficientes β, o pesquisador geralmente propõe modelos lineares nos parâmetros, o que garante a convexidade da função de verossimilhança e simplifica o processo de sua otimização.

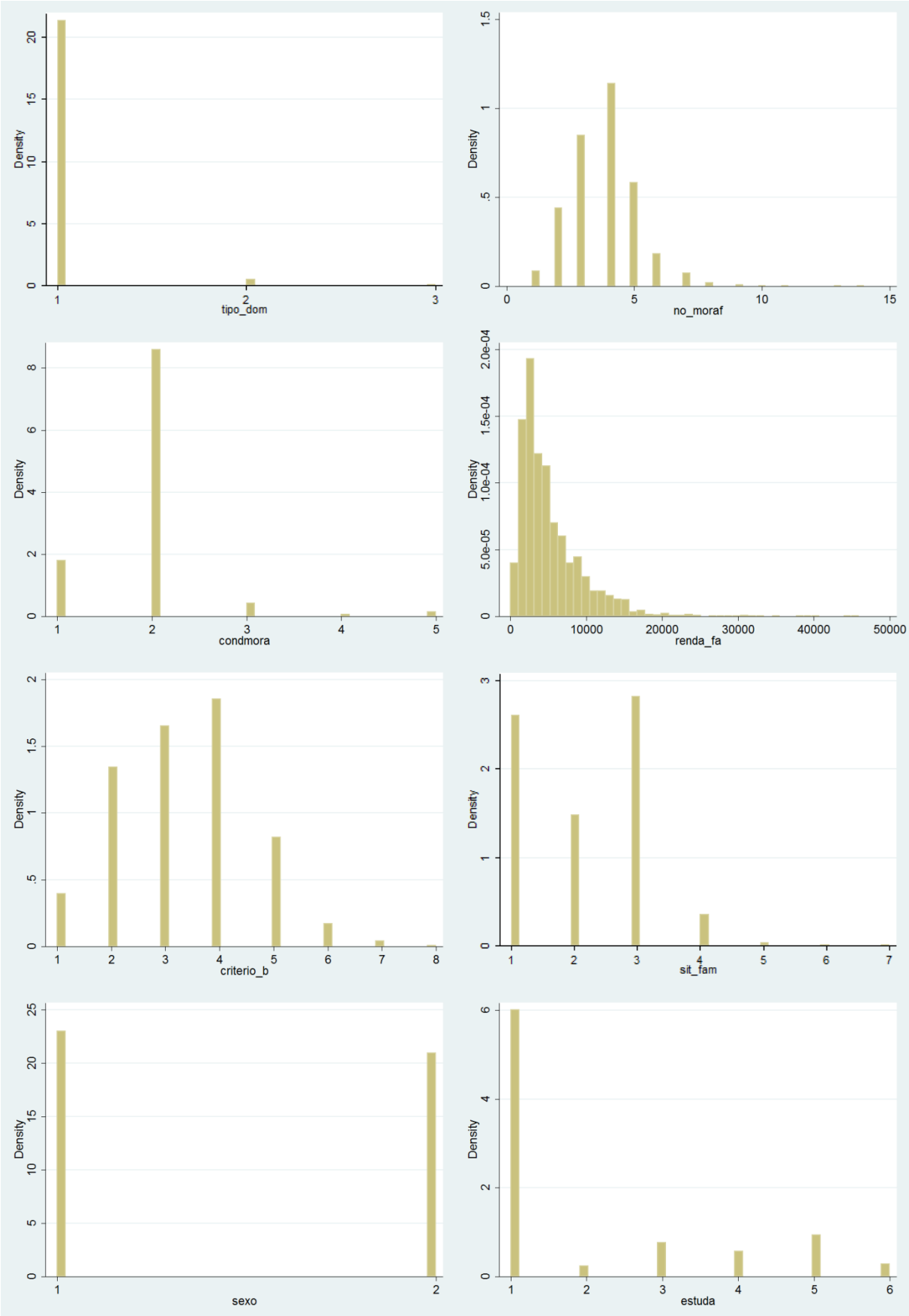
APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS DADOS

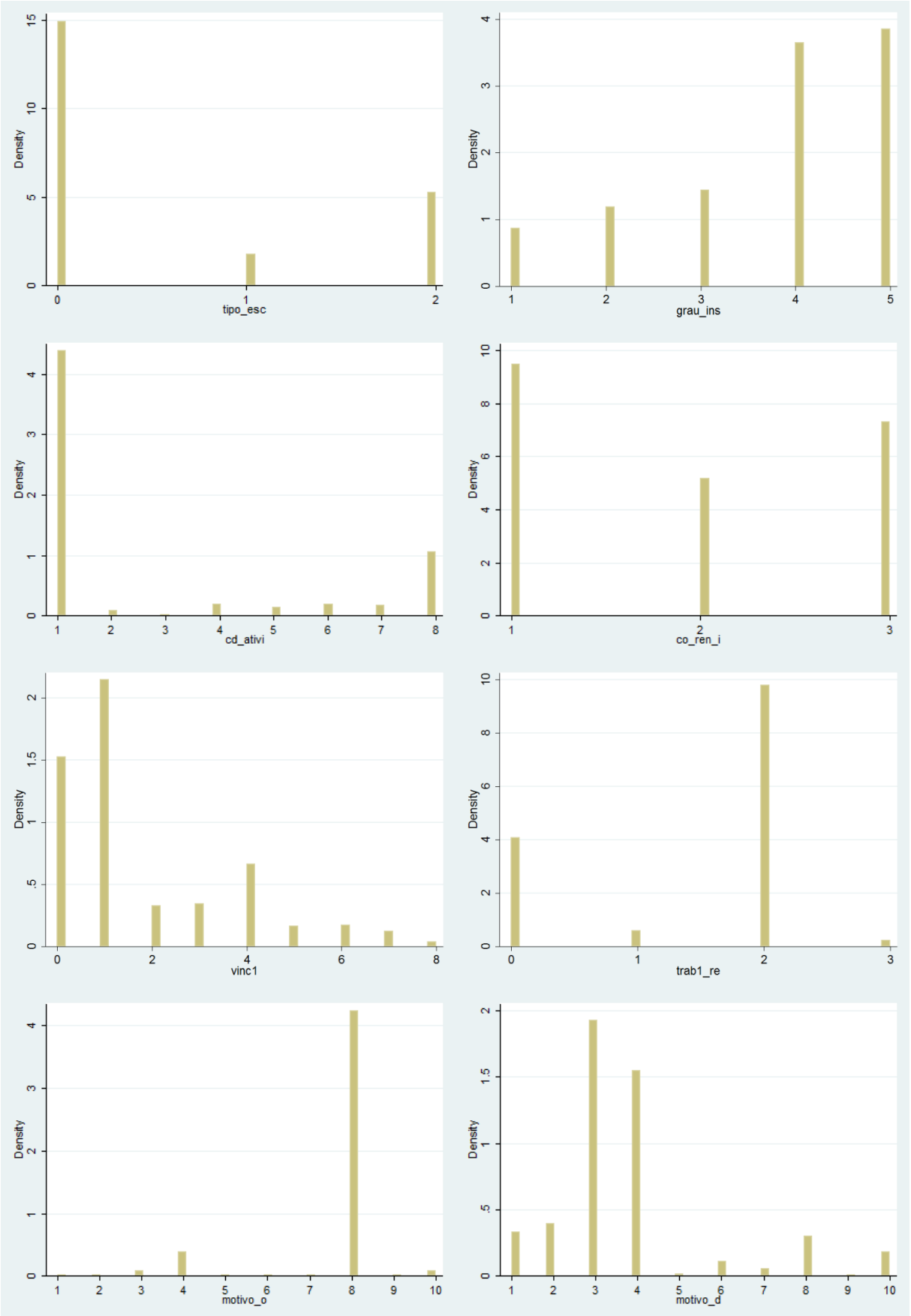
Nesta seção são apresentados os histogramas das variáveis socioeconômicas presentes no banco de dados utilizado para a estimação dos modelos de escolha discreta. Repetem-se aqui as tabelas das variáveis e as possíveis categorias das variáveis categóricas.

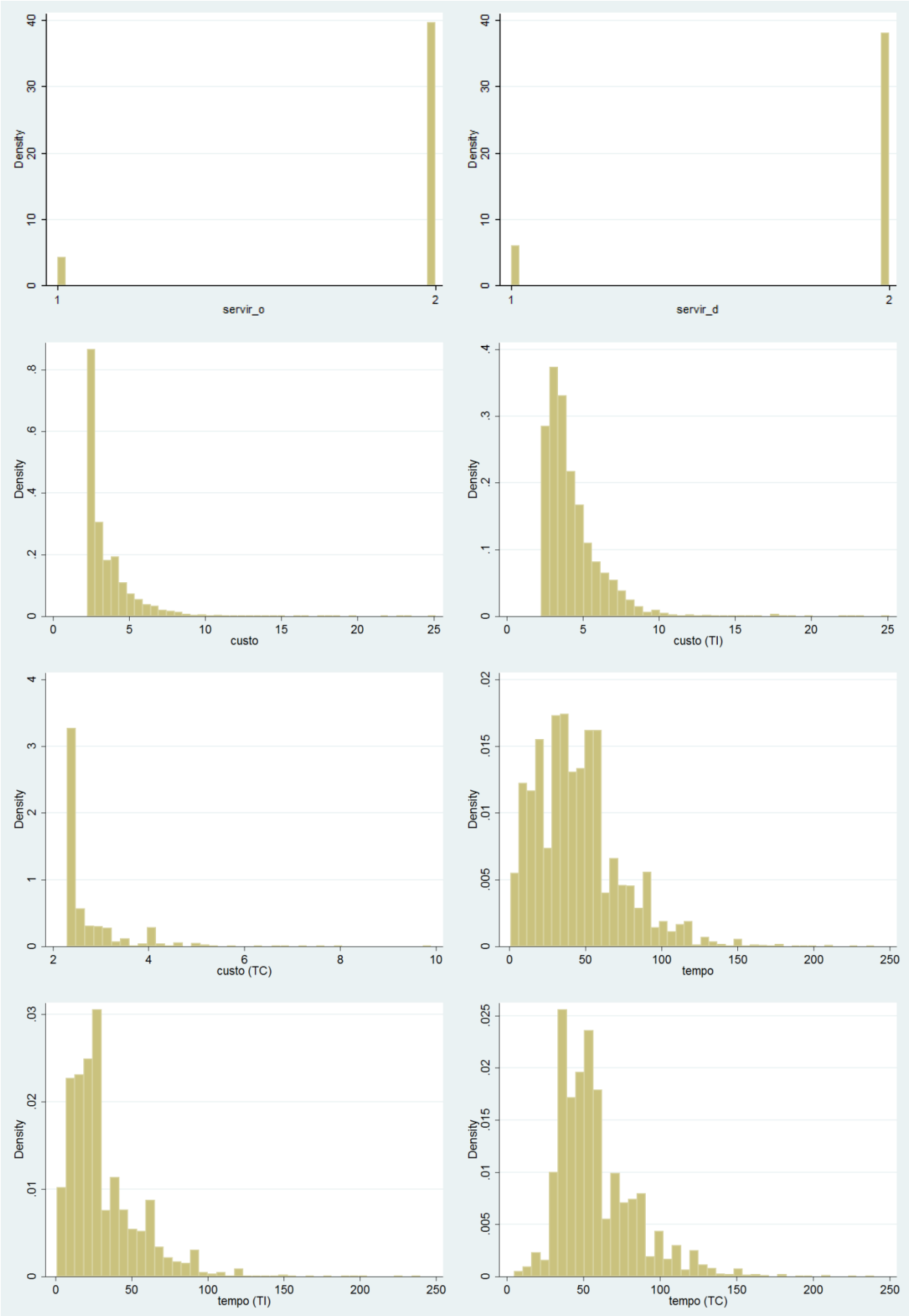
Variável	**Unidade de Referência**	**Tipo de Variável**	**Nome no banco**
Tipo de Domicílio	Domicílio	Categórica	tipo_dom
Total de Moradores na Família	Família	Categórica	no_moraf
Condição de Moradia	Família	Categórica	condmora
Renda Familiar (em R$)	Família	Numérica	renda_fa
Critério de Classificação Econômica Brasil	Família	Categórica	criterio_b
Situação Familiar	Família	Categórica	sit_fam
Gênero	Pessoa	Categórica	sexo
Estuda Atualmente?	Pessoa	Categórica	estuda
Tipo de Escola	Pessoa	Categórica	tipo_esc
Grau de Instrução	Pessoa	Categórica	grau_ins
Condição de Atividade	Pessoa	Categórica	cd_ativi
Condição de Renda Individual	Pessoa	Categórica	co_ren_i
Vínculo Empregatício do 1º Trabalho	Pessoa	Categórica	vinc1
Primeiro Trabalho é igual a Residência ?	Pessoa	Categórica	trab1_re
Motivo na Origem	Viagem	Categórica	motivo_o
Motivo no Destino	Viagem	Categórica	motivo_d
Servir Passageiro na Origem	Viagem	Categórica	servir_o
Servir Passageiro no Destino	Viagem	Categórica	servir_d
Custo	Viagem	Numérica	custo
Tempo	Viagem	Numérica	tempo
Modo	Viagem	Categórica	modo
Escolheu o modo em questão?	Viagem	Categórica	escolheu_modo
Custo em termos de % de renda	Viagem/Família	Numérica	custo_renda
Identificador de Viagem	Viagem	Texto	ID_Viag
Identificador de Pessoa	Viagem	Texto	id_pess
Identificador de Família	Viagem	Texto	id_fam
Identificador de Domicílio	Viagem	Texto	id_dom

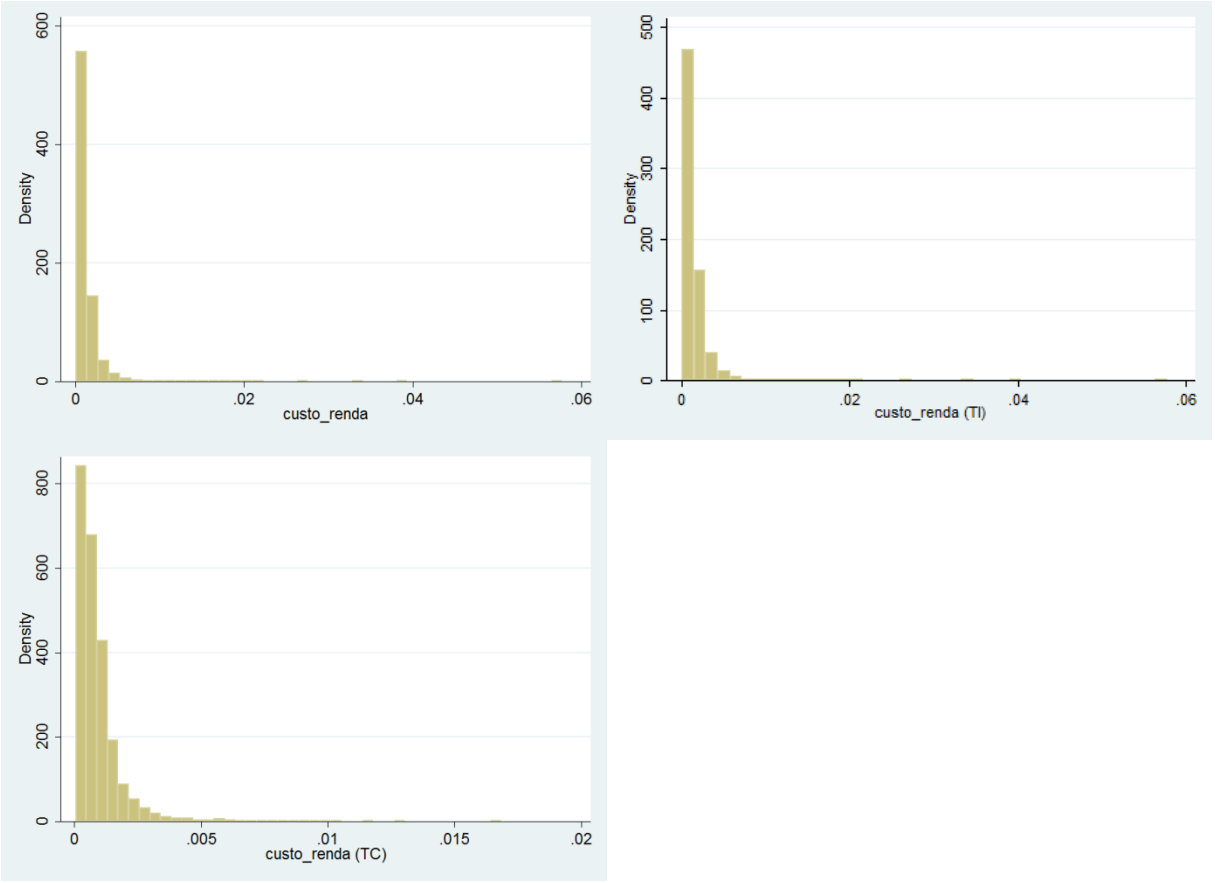
Variável	Possíveis valores assumidos (Vars. Categóricas)
Tipo de Domicílio	1 – Particular
	2 – Coletivo
	3 – Favela
Condição de Moradia	1 - Alugada
	2 - Própria
	3 - Cedida
	4 - Outros
	5 - Não Respondeu
Critério de Classificação Econômica Brasil	1 – A1
	2 – A2
	3 – B1
	4 – B2
	5 – C1
	6 – C2
	7 – D
	8 – E
Situação Familiar	1 – Pessoa Responsável
	2 – Cônjuge/Companheiro(a)
	3 – Filho(a)/Enteado(a)
	4 - Outro Parente
	5 - Agregado
	6 - Empregado Residente
	7 - Parente do Empregado
Gênero	1 - Masculino
	2 - Feminino
Estuda Atualmente?	1 - Não
	2 - Creche/Pré-Escola
	3 - 1º Grau /Fundamental
	4 - 2º Grau/Médio
	6 – Superior/Universitário
	7 - Outros
Tipo de Escola	0 - Não estuda
	1 - Pública
	2 - Particular
Grau de Instrução	1 - Não-Alfabetizado/Primário Incompleto
	2 - Primário Completo/Ginásio Incompleto
	3 - Ginásio Completo/Colegial Incompleto
	4 - Colegial Completo/Superior Incompleto
	5 - Superior Completo
Modo	TC - Transporte Coletivo
	TI - Transporte Individual
Servir Pass. na Origem	1 - Sim
	2 - Não

Variável	Possíveis valores assumidos (Vars. Categóricas)
Condição de Atividade	1 - Tem trabalho
	2 - Faz bico
	3 - Em Licença Médica
	4 - Aposentado/Pensionista
	5 - Sem Trabalho
	6 - Nunca Trabalhou
	7 - Dona de Casa
	8 - Estudante
Condição de Renda Individual	1 - Tem Renda
	2 - Não Tem Renda
	3 - Não Respondeu
Vínculo Empregatício do 1º Trabalho	0 - Não trabalha
	1 - Assalariado com carteira
	2 - Assalariado sem carteira
	3 - Funcionário Público
	4 - Autônomo
	5 - Empregador
	6 - Profissional Liberal
	7 – Dono de Negócio Familiar
	8 - Trabalho Familiar
Primeiro Trabalho é igual à Residência ?	0 - Não trabalha
	1 - Sim
	2 - Não
	3 – Sem endereço fixo
Motivo na Origem	1 - Trabalho/Indústria
	2 - Trabalho/Comércio
	3 - Trabalho/Serviços
	4 - Educação
	5 - Compras
	6 - Saúde
	7 - Lazer
	8 - Residência
	9 – Procurar Emprego
	10 – Assuntos Pessoais
Motivo no Destino	Igual à variável "Motivo na Origem"
Esc. o modo em questão?	0 - Não
	1 - Sim
Servir Pass. no Destino	1 - Sim
	2 - Não


Density
tipo_dom
no_moraf
condmora
renda_fa
criterio_b
sit_fam
sexo
estuda


Density
tipo_esc
grau_ins
cd_ativi
co_ren_i
vinc1
trab1_re
motivo_o
motivo_d


Density
servir_o
servir_d
custo
custo (TI)
custo (TC)
tempo
tempo (TI)
tempo (TC)


Density
0
200
400
600
0
.02
.04
.06
custo_renda
Density
0
100
200
300
400
500
0
.02
.04
.06
custo_renda (TI)
Density
0
200
400
600
800
0
.005
.01
.015
.02
custo_renda (TC)